

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Modelització i simulació d'una microxarxa basada en
convertidors VSC**

MEMÒRIA

Autor: Gerard Antón Soriano
Directors: Oriol Gomis Bellmunt,
Enric Sánchez Sánchez
Convocatòria: Juny 2017



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En aquest treball es detalla la modelització d'una microxarxa basada en els convertidors AC/DC coneguts com a VSC (Voltage Source Converter) pas a pas que inclourà dos generadors ideals que generen la xarxa des de diferents posicions, una placa fotovoltaica, una bateria i dues càrregues.

La microxarxa s'ha modelat fent us del programari de Simulink de MATLAB, un entorn de programació visual que permet el disseny de circuits elèctric i de control interconnectant diferents blocs funcionals i simular-ne el comportament dinàmic.

En aquest document s'inclouen els resultats de les simulacions del seu comportament, tant de la microxarxa completa, com de cadascun dels passos realitzats, ja que els dispositius s'implementen de forma modular i progressiva.

Finalment s'estudia la possibilitat d'implementar un droop de freqüència en el futur per a controlar el repartiment de potència entre els dos generadors ideals.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. GLOSSARI	5
2. INTRODUCCIÓ	7
2.1. Objectius del projecte	7
2.2. Abast del projecte	7
3. MICROXARXA	8
4. CONVERTIDOR	10
4.1. Model promitjat	11
4.2. Transformada de Park	11
4.2.1. Llaç de seguiment de fase	13
5. GENERACIÓ DE LA XARXA	15
5.1. Control de la xarxa	15
5.1.1. Current loop	15
5.1.2. Voltage loop	17
5.2. Prova de funcionament	19
6. PLACA FOTOVOLTAICA	22
6.1. Control del convertidor	22
6.1.1. Emulació de la font d'energia	23
6.1.2. Bloc de la placa fotovoltaica	26
7. BATERIA	30
7.1. Modelització de la bateria	30
7.2. Control del convertidor	32
7.2.1. Control de l'estat de funcionament	33
7.3. Prova de funcionament	34
8. SEGONA GENERACIÓ DE XARXA	37
8.1. Distribució de potència	37
8.1.1. Estudi de la distribució	37
8.2. Droop de freqüència	41
9. DIMENSIONAMENT	43

10. ESTUDI DE VIABILITAT	46
10.1. Estudi econòmic.....	46
10.2. Estudi d'impacte ambiental	46
11. ANÀLISIS DE RESULTATS	47
11.1. Generació de xarxes i distribució de potències	47
11.2. Placa fotovoltaica	49
11.3. Bateria.....	49
CONCLUSIONS	51
Limitacions del sistema	51
Acció de futur.....	51
AGRAÏMENTS	52
BIBLIOGRAFIA	53
Referències bibliogràfiques	53
Articles i literatura.....	53
Pàgines web.....	53
ANNEXOS	54
Annex 1: Circuit elèctric i de control en Simulink.....	54
Circuit complet	54
Ampliació a la generació de la xarxa.....	55
Llaç de control de la generació de xarxa	55
Voltage loop	56
Current loop	56
Ampliació PV.....	57
Llaç de control de PV	57
Regulació del corrent de contínua de PV	58
Ampliació Bateria	58
Llaç de control de la bateria	59
Regulador d'intensitat de la bateria	59
Transformada de Park	59
Antitransformada de Park.....	60
Annex 2: Dialog Box de blocs utilitzats.....	61
PV Array.....	61
Battery	62

1. Glossari

- AC: Corrent alterna
- DC: Corrent contínua
- VSC: Voltage Source Converter
- IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor
- MATLAB: MATrix LABoratory, software matemàtic
- Simulink: Mòdul de MATLAB que permet simular el comportament dinàmic d'un sistema basat en blocs
- Simscape: Llibreria de Simulink que conté blocs que modelen sistemes físics.

2. Introducció

Per a integrar sistemes de generació elèctrica distribuïda, especialment si són provinents d'una font d'energia renovable, és molt útil la implementació d'una microxarxa, ja que es tracta d'un sistema molt flexible i adaptable davant dels canvis i una de les característiques principals de les fonts d'energia renovable és la seva impredictibilitat i intermitència.

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és modelitzar d'una microxarxa basada en convertidors VSC (Voltage Source Converter) i simular-ne el funcionament per a validar el model i analitzar-ne el comportament.

La microxarxa estarà formada per dos generadors ideals que l'alimentaran des de diferents posicions, una bateria, una placa fotovoltaica i càrregues.

L'objectiu és modelitzar i controlar la microxarxa de manera que optimitzi els fluxos de potència entre els components i repartir la potència entre els dos generadors ideals.

2.2. Abast del projecte

L'objectiu principal del projecte és modelar i simular la microxarxa, en cap cas s'ha tingut pensat construir-la físicament o dimensionar-ne els components.

La principal simplificació realitzada és considerar ideals els dos generadors de xarxa, ni s'emularen ni es modelitzaran, es comportaran com si és tractessin d'una bateria de capacitat infinita.

A més, per a simular aquesta microxarxa es duran a terme diverses simplifications en cadascun dels dispositius que formen la microxarxa i en els seus respectius controls que seran explicats més endavant en cadascun dels seus apartats.

L'alimentació de les fonts de tensió alterna que controlen els VSC es farà de forma directa, és a dir, no s'implementarà un sistema de PWM (Pulsed Width Modulation).

Finalment, es tindrà en compte la possibilitat d'implementar un droop de freqüència per a controlar el repartiment de potència entre els dos generadors ideals.

3. Microxarxa

Una microxarxa és un sistema de distribució elèctrica de baixa tensió que interconnecta dispositius com ara càrregues, bateries i plaques fotovoltaïques o molins eòlics. A més a més, una microxarxa ha d'estar clarament diferenciada de, per exemple, una xarxa elèctrica general i poder ser controlada com a una única entitat, estigui connectada a una altra xarxa o no.

Una microxarxa aïllada (com la del cas que ens ocupa) presenta tres funcions principals que s'han implementat de la següent manera. La generació local, en forma de plaques fotovoltaïques; el consum, en forma de càrregues alternes; i l'emmagatzematge d'energia, en forma de la bateria.

La microxarxa implementada és generada per dues fonts que es consideraran ideals, ja sigui un generador que funcioni amb combustible o una bateria de gran capacitat, de manera que la xarxa sempre podrà extreure la potència necessària per a mantenir-se d'aquests dos dispositius.

Una d'aquestes fonts estarà situada a una certa distància respecte la resta de la microgrid, representant-se aquesta distància per mitjà de resistències i inductàncies per a simular les pèrdues degudes a aquesta, la resta de connexions de la xarxa es consideraran ideals i per tant sense pèrdues.

Alguns dels elements de la xarxa (com les plaques fotovoltaïques i les bateries) funcionen necessàriament en corrent continu, mentre que la xarxa que connecta aquests dispositius és trifàsica, de manera que per a connectar-los, caldrà utilitzar inversors AC/DC, que a més a més, permeten controlar els fluxos de potència en l'orde de mil·lisegons per a garantir que l'intercanvi sigui òptim.

En aquest cas, tots els dispositius que precisin un convertidor AC/DC en tindran un exclusivament, en comptes de compartir-los, i cadascun es controlarà de forma independent de la resta, excepte en el cas de la bateria, que dependrà de si la placa fotovoltaïca està en funcionament o no.

En el següent esquema mostra el circuit elèctric de la microxarxa, i a més s'hi indiquen els diferents dispositius que en formen part:

- 1- Placa fotovoltaïca
- 2- Generador de xarxa
- 3- Bateria
- 4- Càrrega
- 5- Pèrdues de conducció
- 6- Generador de xarxa

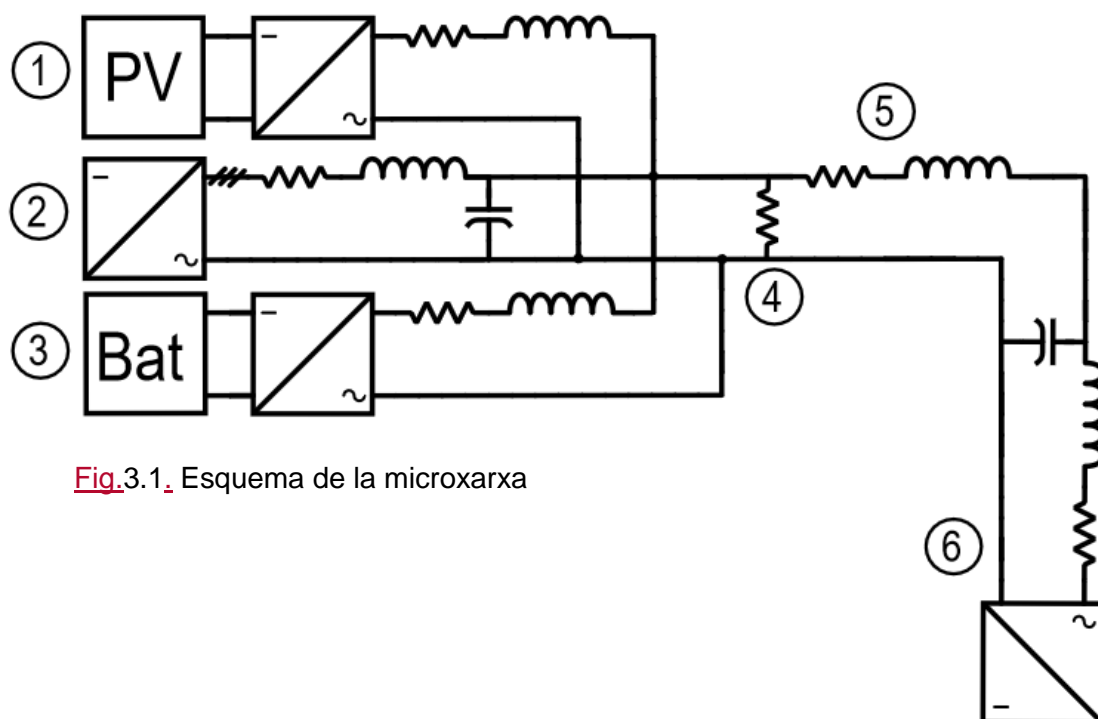


Fig.3.1. Esquema de la microxarxa

4. Convertidor

Com la xarxa elèctrica és trifàsica i la majoria dels elements que s'hi connecten funcionen en contínua, fa falta un element que permeti transmetre la potència elèctrica entre aquests elements.

D'aquesta manera, per a generar una xarxa trifàsica i per a connectar-hi els diferents elements que funcionen en contínua, tant siguin per a emmagatzemar energia com per a produir-la, i transmetre la potència entre aquests i la xarxa, farà falta un convertidor AC/DC bidireccional ja que ha de poder injectar-hi potència, però també extreure'n per a carregar les bateries.

L'inversor utilitzat és un VSC (Voltage Source Converters) [1] basats en la tecnologia IGBT (Isolated-Gate Bipolar Transistor).

Per a intercanviar potència entre els costats d'alterna i contínua, se connecten tres branques amb 2 IGBTs a cadascun dels tres fils de la xarxa trifàsica mitjançant tres inductàncies. Per a obtenir les tres fases de voltatge desitjades s'ha de modular la commutació dels IGBT, tal com es pot comprovar a la figura 4.1.

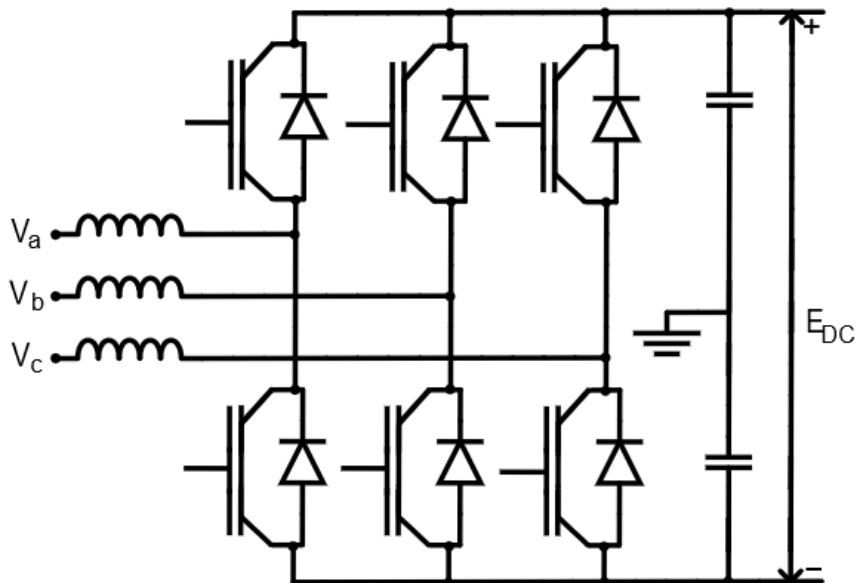


Fig.4.1. Esquema d'un inversor VSC

4.1. Model promitjat

El convertidor VSC es pot simplificar utilitzant el model promitjat, en que se separen les parts d'alterna i contínua [2].

La part alterna es modela com a tres fonts de tensió alternes i la contínua com una font de corrent i un capacitor.

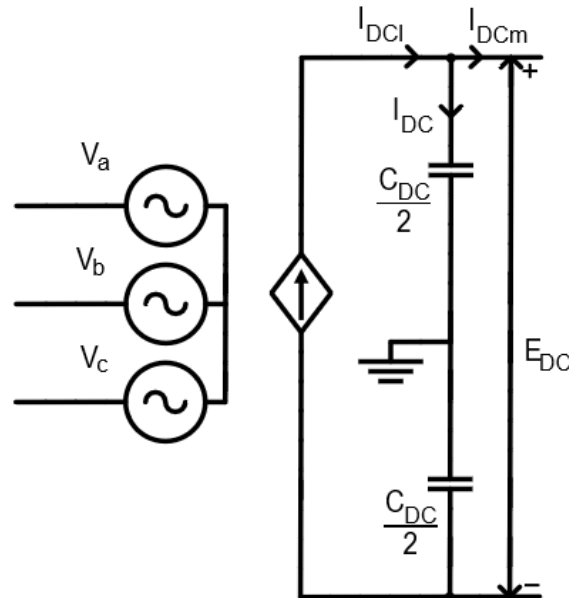


Fig.4.2. VSC simplificat

Considerant ideal el convertidor, s'igualen les potències del costat d'alterna i del bus de contínua:

$$P_{AC} = P_{DC}$$

Es pot emular un generador com a una font de corrent en el bus de contínua (I_{DCm}) i utilitzant només el costat d'alterna es pot generar una xarxa.

4.2. Transformada de Park

Degut als controladors utilitzats en els convertidors és millor utilitzar una referència ortogonal i quantitats constants. Per això caldria passar de la referència trifàsica a ortogonal mitjançant la Transformada de Clarke [3], però aquesta és una referència fixa, de manera que s'utilitza la Transformada de Park [4] per a passar a una referència ortogonal mòbil (referència síncrona) per a tenir quantitats constants:

$$[x_{qdo}] = [T_{qdo}][x_{abc}]$$

$$[x_{abc}] = [T_{qdo}]^{-1}[x_{qdo}]$$

$$T(\theta) = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$T^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$

Per a obtenir valors constants cal utilitzar un angle θ que correspongui a l'angle elèctric del voltatge de la xarxa ($\theta = \omega t + \phi_0$).

En la referència de Park les potències aparent, activa i reactiva es calculen amb les següents fórmules:

$$\underline{S}_{AC} = P_{AC} + jQ_{AC}$$

$$P_{AC} = \frac{3}{2}(v_q i_q + v_d i_d)$$

$$Q_{AC} = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q)$$

Tal com es pot observar a la figura 4.3., al aplicar l'angle elèctric adequat, la transformada de Park dóna x_d i x_0 s'anul·len, mentre que x_q té la forma del valor màxim de la variable x en la referència trifàsica.

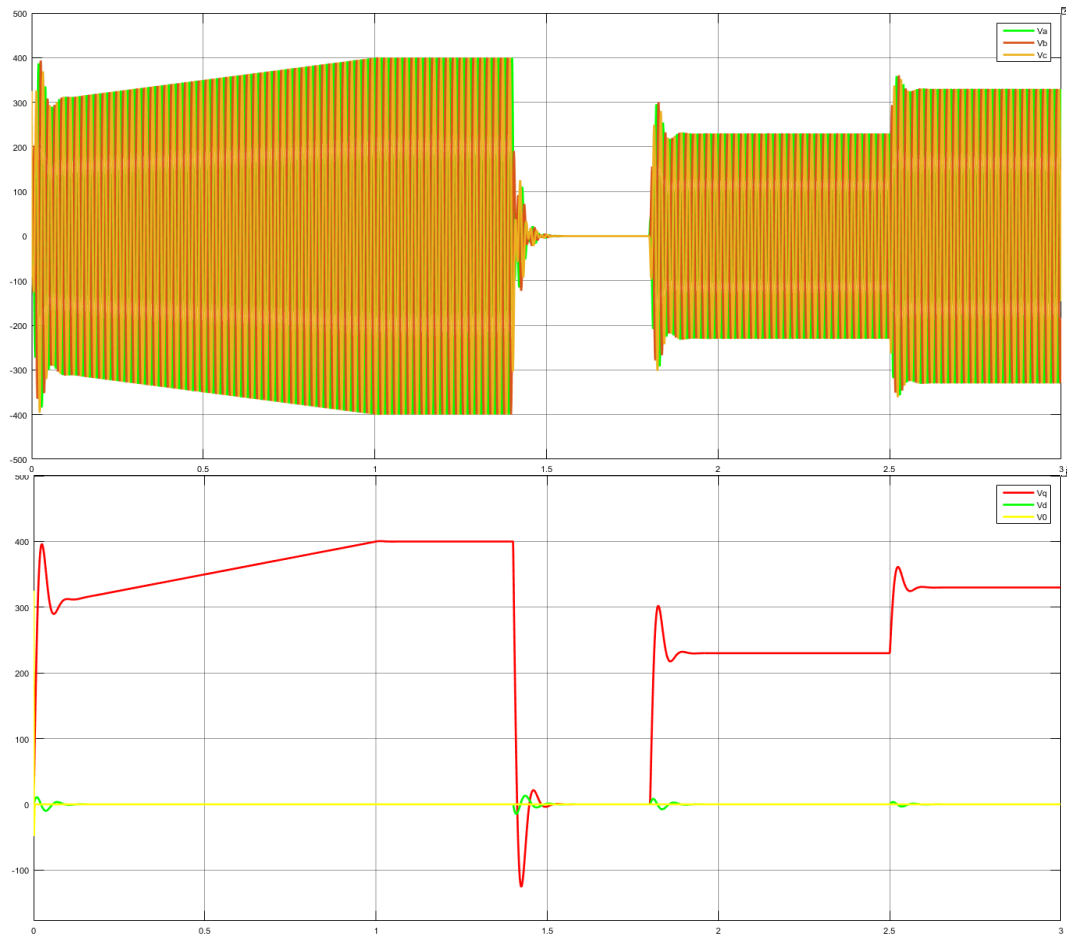


Fig.4.3. Exemple d'aplicació de la transformada de Park

4.2.1. Llaç de seguiment de fase

Per a obtenir tant la velocitat angular (per a desacoblaments) i l'angle d'una determinada variable elèctrica alterna, s'utilitza un llaç de seguiment de fase o Phase Locked Loop (PLL).

El PLL [2] és un dispositiu que permet obtenir la velocitat angular d'una variable alterna realimentant la component d de la variable en qüestió comparant-la amb una consigna nul·la, i filtrant l'error amb un controlador PI. L'angle s'obté posteriorment integrant la velocitat o multiplicant-la per una rampa de pendent unitària.

El controlador utilitzat té la següent forma:

$$C_{PLL}(s) = K_{PLL} \left(\frac{\frac{1}{\tau_{PLL}} + s}{s} \right)$$

Assumint que l'error entre l'angle obtingut en el PLL (θ^*) i l'angle real (θ) és negligible, és pot linealitzar el sistema obtenint el següent sistema de segon ordre:

$$\frac{\theta^*(s)}{\theta(s)} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + \xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

A partir d'aquestes expressions es pot obtenir els valors dels paràmetres K_{PLL} i τ_{PLL} en funció dels paràmetres de la funció de transferència del sistema:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{PLL} V_{Cq}}{\tau_{PLL}}}$$

$$\xi = \frac{\sqrt{K_{PLL} V_{Cq} \tau_{PLL}}}{2}$$

$$\xi \omega_n = \frac{K_{PLL} V_{Cq}}{2}$$

$$\frac{\xi}{\omega_n} = \frac{\tau_{PLL}}{2}$$

D'aquesta manera, s'obtenen les expressions dels paràmetres del PI, on ξ és el factor d'esmoreïment, ω_n és la velocitat angular nominal de la variable, i V_{Cq} és la consigna de la component q del (en aquest cas) voltatge en la referència de Park, que coincideix amb el valor de pic en una referència trifàsica:

$$K_{PLL} = \frac{2\xi\omega_n}{V_{Cq}}$$

$$\tau_{PLL} = \frac{2\xi}{\omega_n}$$

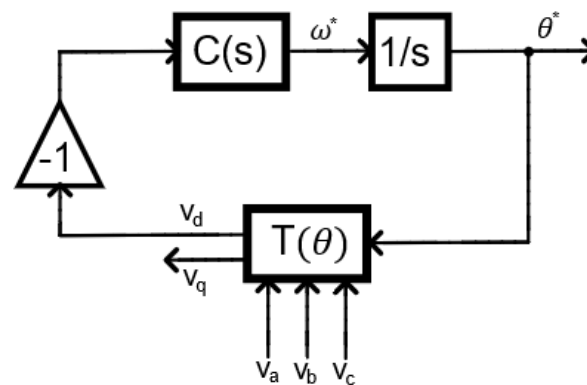


Fig. 4.4. Diagrama de blocs del PLL

5. Generació de la xarxa

Per a crear la xarxa s'utilitza només el costat d'alterna del VSC connectat a tres capacitats on s'imposarà la tensió trifàsica desitjada i a una càrrega, ja que la font que permet generar la xarxa es considerarà ideal i no és modelitzarà, i també se considerarà que existeix un sistema que manté en equilibri el costat de contínua.

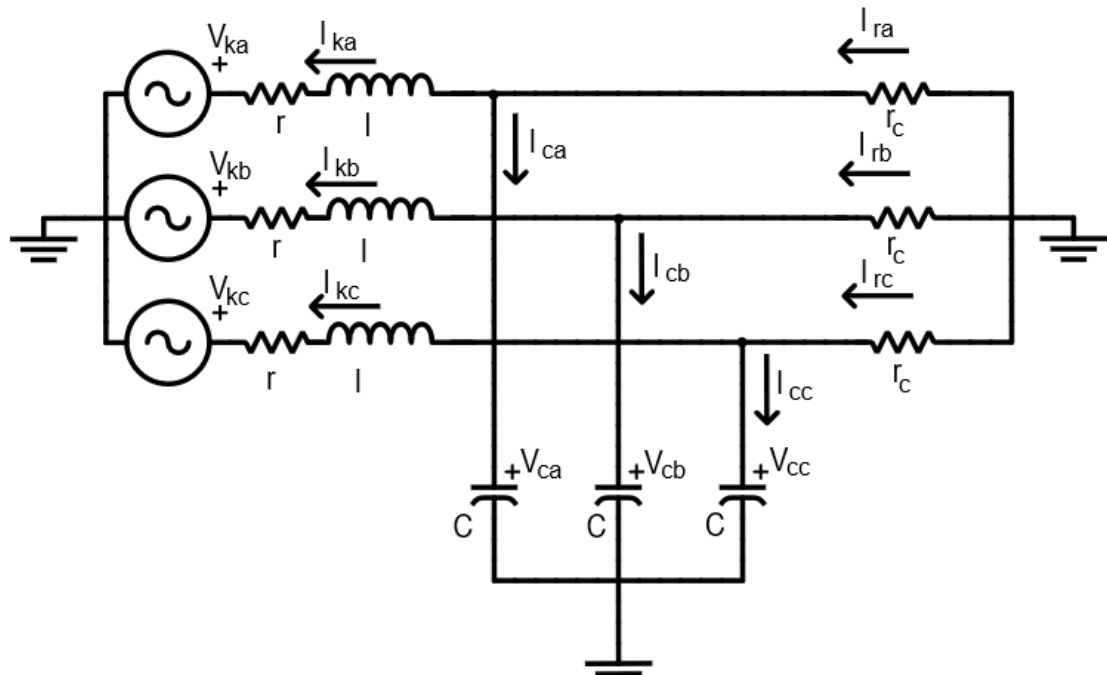


Fig.5.1. Esquema del generador de la xarxa

5.1. Control de la xarxa

L'objectiu del control d'aquest inversor és el d'assegurar que les tensions V_c de les capacitats siguin aquelles que s'entren com a consigna, que s'introduiran com a les components q i d .

5.1.1. Current loop

Independentment de la funció de cada VSC, el control dels convertidors es basa en les fonts de tensió alternes controlades que representen les tensions del costat d'alterna de l'inversor. Aquestes tensions s'obtenen a través de la diferència de potencial entre el convertidor i la xarxa i la intensitat que hi circula. La forma d'obtenir les referències de corrent alternes depèn de la funció donada a cada convertidor.

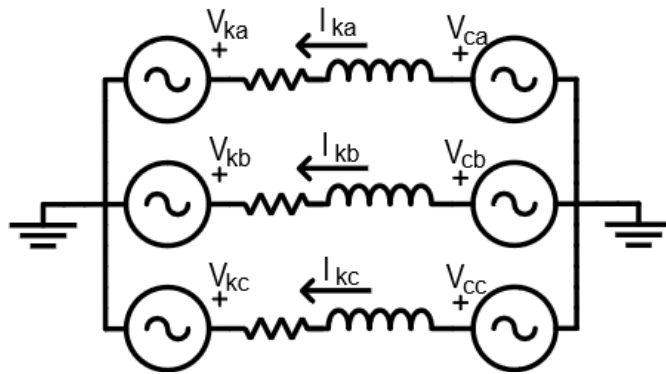


Fig. 5.2. Part alterna del VSC i la xarxa

L'equació d'aquest circuit al aplicar la segona llei de Kirchhoff en la referència abc és:

$$\begin{bmatrix} v_{ca} - v_{ka} \\ v_{cb} - v_{kb} \\ v_{cc} - v_{kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ka} \\ i_{kb} \\ i_{kc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l & 0 & 0 \\ 0 & l & 0 \\ 0 & 0 & l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ka} \\ i_{kb} \\ i_{kc} \end{bmatrix}$$

I en la referència síncrona després d'aplicar la transformada de Park:

$$\begin{bmatrix} v_{cq} - v_{kq} \\ v_{cd} - v_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & l\omega \\ -l\omega & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{kq} \\ i_{kd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l & 0 \\ 0 & l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{kq} \\ i_{kd} \end{bmatrix}$$

On V_c és la tensió de la xarxa, V_k és la tensió de la part alterna del convertidor VSC i ω és la freqüència elèctrica en rad/s.

D'aquesta forma s'obtenen les equacions per a obtenir les V_k amb les que s'alimentaran les fonts de tensió de la part d'alterna de l'inversor per a obtenir la tensió de xarxa desitjada:

$$\begin{bmatrix} v_{kq} \\ v_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{cq} - l\omega i_{kd} - r i_{kq} - l \frac{d}{dt} i_{kq} \\ v_{cd} + l\omega i_{kq} - r i_{kd} - l \frac{d}{dt} i_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{cq} - l\omega i_{kd} - \widehat{v_{kq}} \\ v_{cd} + l\omega i_{kq} - \widehat{v_{kd}} \end{bmatrix}$$

On V_{kqd0} son els valors que s'imposaran a les fonts de tensió en la referència de Park i $\widehat{V_{kqd0}}$ les sortides dels controladors PI que s'utilitzaran i aplicant la transformada de Laplace a la funció de transferència entre els corrents i els voltatges del convertidor obtenim:

$$\widehat{v_{kqd0}}(s) = (r + ls) \cdot i_{kqd0}(s)$$

I mitjançant el mètode IMC (Internal Model Control) [2] obtenim un controlador PI de constants:

$$G_c(s) = \frac{K_I + K_P s}{s} \text{ amb } K_I = \frac{r}{\tau_I}, K_P = \frac{l}{\tau_I}$$

On r i l són els valors de la resistència i la inductància entre el convertidor i la xarxa i τ és la constant de temps. El current loop té la següent forma:

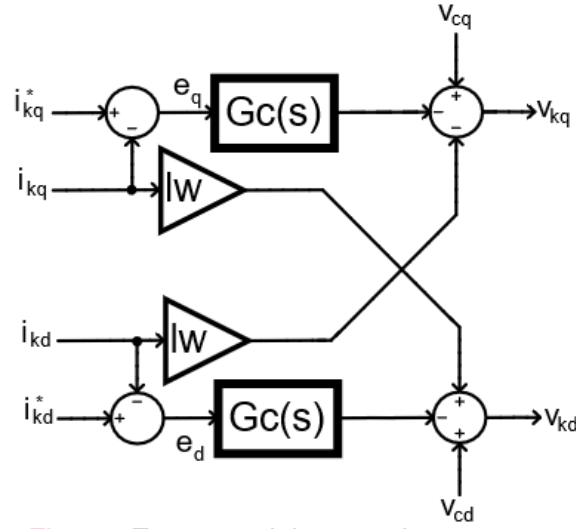


Fig. 5.3. Esquema del current loop

5.1.2. Voltage loop

En el cas particular de la generació de la xarxa, les consignes de corrent utilitzades en el current loop s'obtenen a partir de les consignes de tensió de la xarxa introduïdes per l'usuari.

En aquest cas es generarà una xarxa típica de 330 V amb una freqüència de 50 Hz, que s'introdueix directament en la referència de Park, de manera que fixant V_{cq} a 330V i V_{cd} a 0, al assegurar que θ sigui una rampa de pendent $2\pi f$, i per tant ω una constant del mateix valor, es pren la tensió de la xarxa com a referència per la resta de variables elèctriques del circuit.

Prenent com a referència l'esquema de la figura 4 i utilitzant la primera llei de Kirchhoff juntament amb l'equació diferencial del condensador s'obté:

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ra} - i_{ka} \\ i_{rb} - i_{kb} \\ i_{rc} - i_{kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix}$$

Que utilitzant la transformada de Park es converteix en:

$$\begin{bmatrix} i_{cq} \\ i_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{rq} - i_{kq} \\ i_{rd} - i_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C\omega \\ -C\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cq} \\ v_{cd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l & 0 \\ 0 & l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{cq} \\ v_{cd} \end{bmatrix}$$

D'on s'aïlla i_{qd0} per a obtenir:

$$\begin{bmatrix} i_{kq} \\ i_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{rq} - C\omega v_{cd} - C \frac{d}{dt} v_{cq} \\ i_{rd} + C\omega v_{cq} - C \frac{d}{dt} v_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{rq} - C\omega v_{cd} - \widehat{i_{kq}} \\ i_{rd} + C\omega v_{cq} - \widehat{i_{kd}} \end{bmatrix}$$

On i_{kqd0} son els valors que s'imposaran com a consigna d'intensitat en el current loop i $\widehat{i_{kqd0}}$ les sortides dels controladors PI que s'utilitzaran.

El corrent loop i el voltage loop formen un sistema de doble llaç tancat on el primer està dintre del segon, i com a simplificació es pot considerar que la funció de transferència del current loop és 1, deixant com a llaç tancat entre $\widehat{i_{kqd0}}$ i i_{kqd0} la següent expressió:

$$L(s) = \frac{K_I + K_P s}{s} \frac{1}{sC} = \frac{K_P s + K_I}{s^2 C}$$

Al estar el current loop dintre del voltage loop, s'ha de assegurar que l'exterior sigui més lent que l'interior per a que el control funcioni adequadament. Com a simplificació es pot prendre la constant de temps com la inversa del valor d'un pol doble i donar valor a les constants del controlador PI en funció de la velocitat de resposta desitjada igualant denominadors:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{\tau_V}$$

$$D^*(s) = \left(s + \frac{1}{\tau}\right)^2 = s^2 + s \frac{2}{\tau_V} + \frac{1}{\tau_V^2}$$

$$D(s) = 1 + L(s) = 1 + \frac{K_P s + K_I}{s^2 C} \propto s^2 + \frac{K_P}{C} s + \frac{K_I}{C}$$

Per tant, les constants utilitzades tindran la forma:

$$K_P = \frac{2}{\tau_V} C; \quad K_I = \frac{C}{\tau_V^2}$$

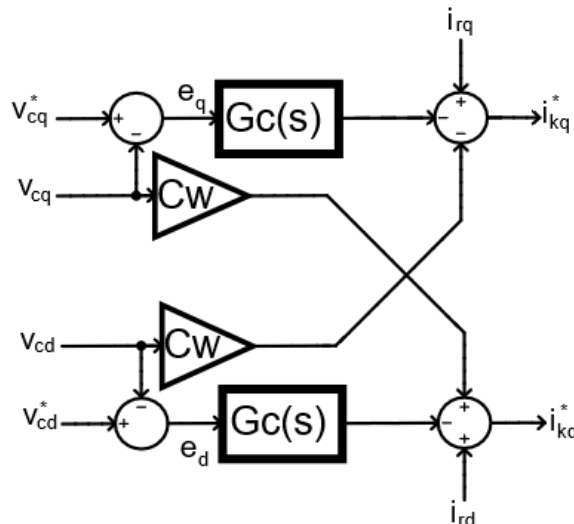


Fig.5.4. Esquema del voltage loop

5.2. Prova de funcionament

Tot i que la generació de la xarxa és només una part de la xarxa a dissenyar, seria adequat comprovar-ne el correcte funcionament independentment de la resta del circuit i veure si es comporta de la manera esperada.

Per això es duu a terme una simulació amb Simulink on com a consigna s'introdueixen els valors desitjats del voltatge de la xarxa.

En aquest primer cas s'introduiran els valors per a generar la xarxa que s'utilitzarà en la resta de simulacions, és a dir $V_{cq}=330V$ i $V_{cd}=0$.

Com es pot comprovar, la xarxa es comporta de la forma esperada:

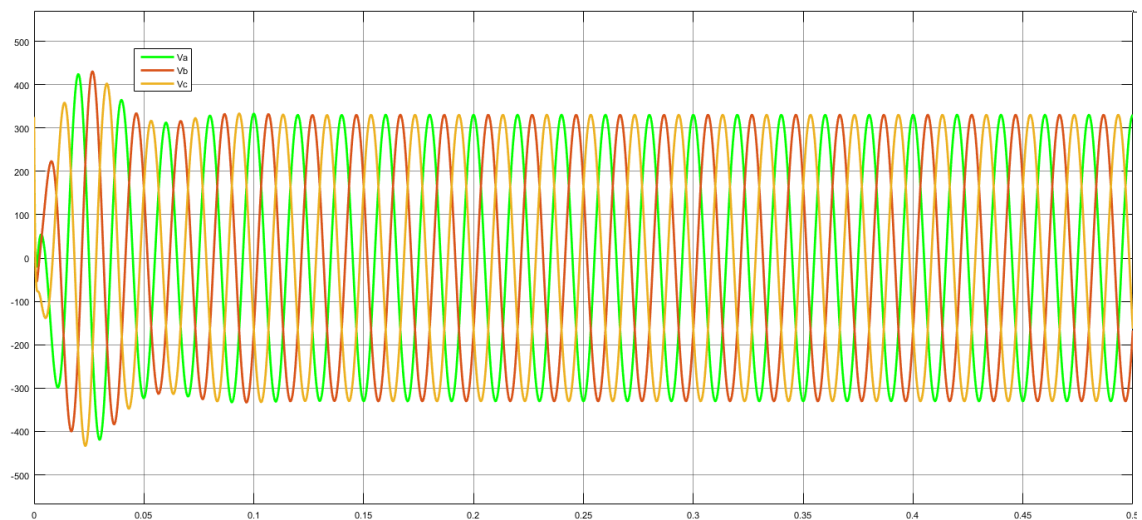


Fig. 5.5. Resultats de $V_c(a,b,c)$

Posteriorment, l'objectiu de la simulació és veure el funcionament dels controladors, de manera que com a consigna de V_{cq} s'utilitzarà un conjunt de consignes graó i s'estudiarà el comportament dels senyals d'error del voltage loop i del current loop.

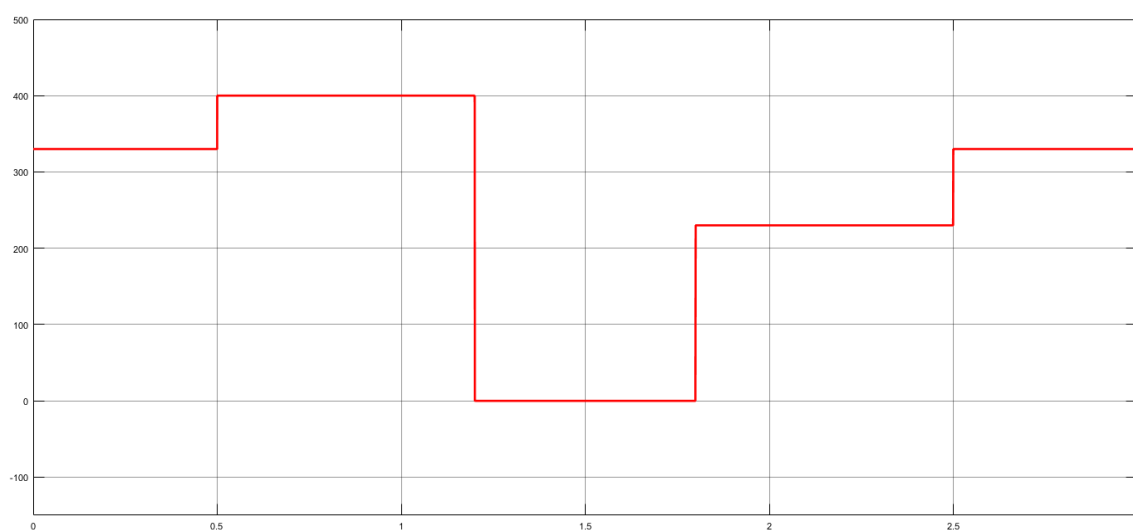


Fig. 5.6. Consigna de V_{cq}

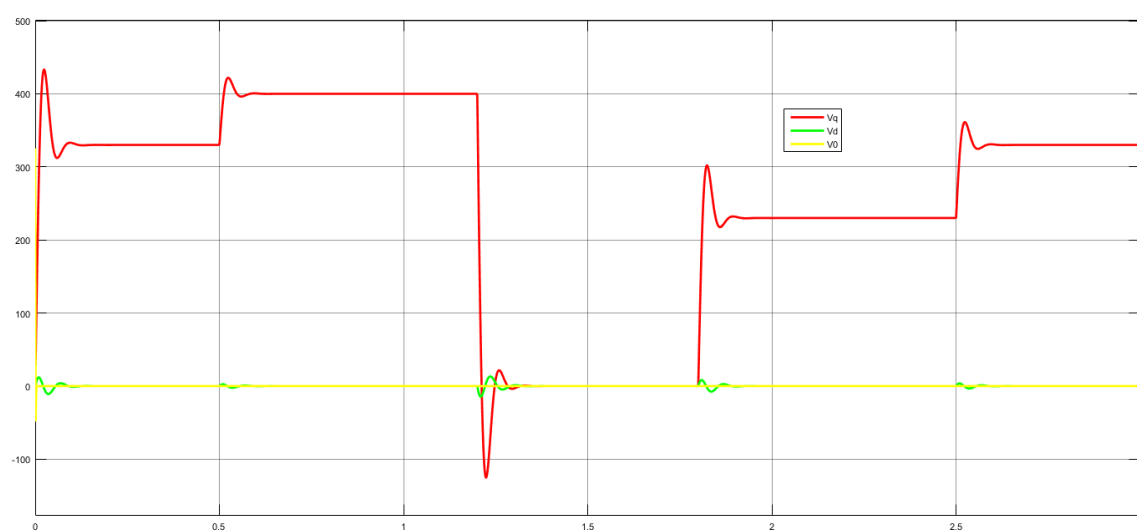


Fig. 5.7. Resultats de $V_c(q,d,0)$

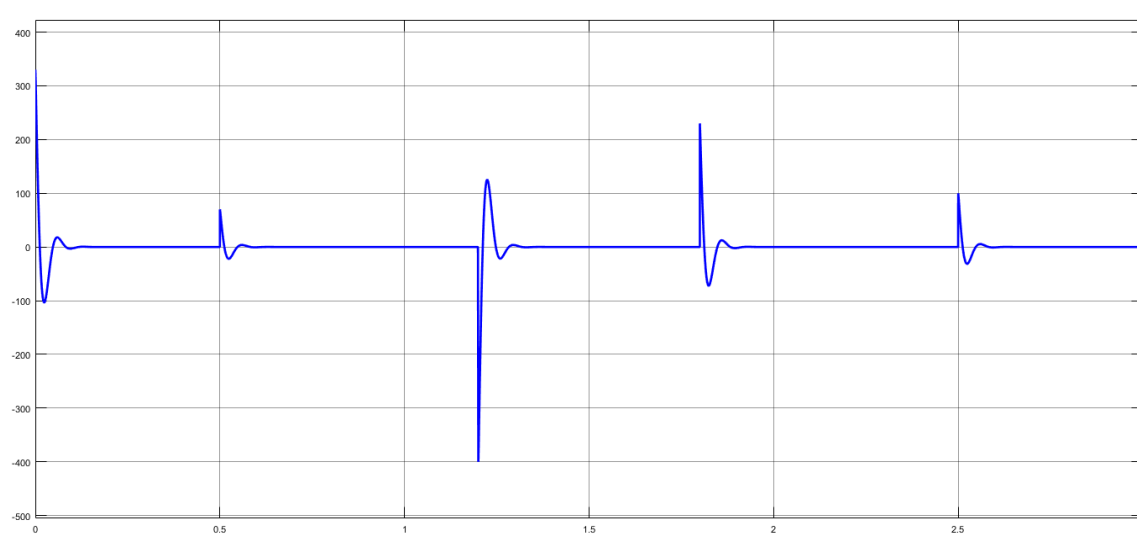


Fig. 5.8. Error del Voltage loop

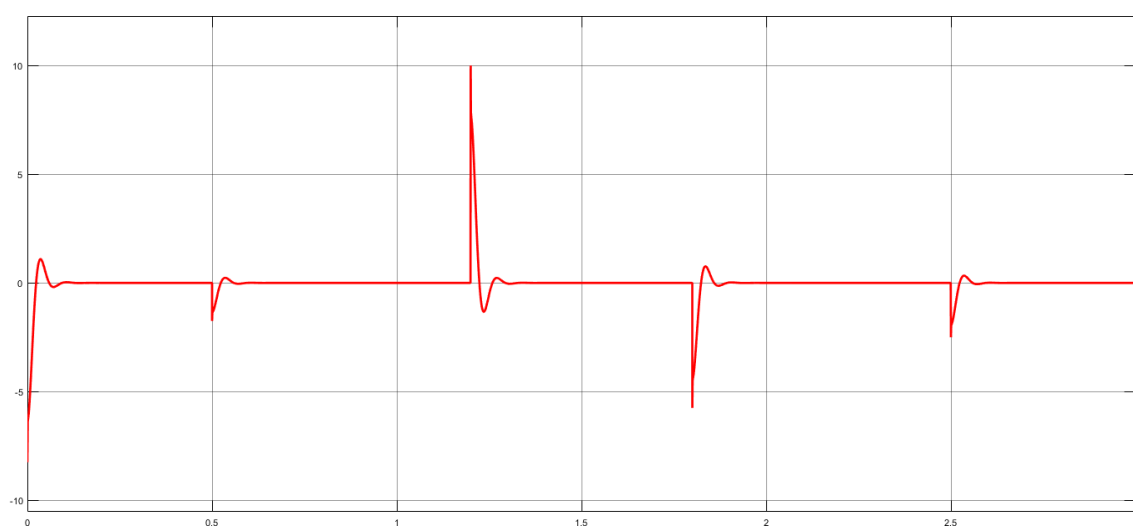


Fig. 5.9. Error del Current loop

Tal com es pot veure, la tensió de xarxa es comporta tal com s'esperava, i a més a més s'assegura la estabilitat en el sistema en cas d'una caiguda de tensió, ja que com es pot veure en els senyals d'error, aquest sempre tendeix a 0 després d'un canvi brusc.

6. Placa fotovoltaica

Una cèl·lula fotovoltaica és un dispositiu electrònic que mitjançant l'efecte fotoelèctric permet transformar energia lluminosa en energia elèctrica capturant fotons i emetent electrons que es poden utilitzar com a corrent elèctric. Les cel·les fotovoltaiques funcionen en corrent continu, de manera que per a traslladar la potència generada a la xarxa farà falta un inversor.

Com a sistema d'energia renovable, el control es realitza regulant la tensió del bus de corrent continu, de forma que es prendrà com a referència el circuit de la figura 2 incloent tant el costat d'alterna com el de continu.

El circuit es controla a través de les fonts de tensió de la banda d'alterna de l'inversor i de la font de corrent I_{DCI} del bus de continu.

6.1. Control del convertidor

Com ja s'ha dit anteriorment, s'han d'obtenir els valors de V_{PV} d'alterna i de la I_{DCI} per a controlar l'inversor VSC de la placa fotovoltaica.

Els valors de les fonts de tensió s'obtenen com en el cas anterior, en el current loop derivat d'aplicar la segona llei de Kirchhoff entre les tensions de la banda d'alterna del convertidor i les tensions de xarxa a partir de les consignes de la corrent del costat d'alterna del VSC.

En aquest cas, les consignes de corrent s'obtenen en la referència síncrona de Park i de forma diferent cadascuna.

En el cas de la i_d^* , s'obté a partir de la consigna de potència reactiva intercanviada pel convertidor, que en aquest cas considerarem nul·la, de forma que la i_d^* també ho serà.

La i_q^* en canvi s'obté igualant les potències alterna i continu del convertidor.

$$P_{AC} = \frac{3}{2} v_{cq} i_{PVq}$$

$$P_{DC} = E_{DC} I_{DCI}$$

Al ser E_{DC} i v_{cq} pràcticament constants durant la operació, es poden substituir els seus valors pels valors de les seves consignes corresponents per a simplificar el procés.

En canvi I_{DCI} s'obté aplicant la primera llei de Kirchhoff en el bus de continu:

$$I_{DCI} = I_{DC} + I_{DCm}$$

On I_{DC} és la sortida del regulador de tensió contínua, de forma que aplicant la transformada de Laplace entre la tensió del bus de contínua i la seva consigna i implementant un controlador proporcional integral (PI), el llaç obert de la funció de transferència serà:

$$L(s) = \frac{K_P s + K_I}{s} \frac{1}{sC}$$

Igualant el denominador de la funció de transferència amb un denominador d'una funció de transferència de segon ordre genèrica, podem obtenir les equacions de les constants del controlador en funció de la velocitat desitjada.

$$D(s) = s^2 + \frac{K_P}{C}s + \frac{K_I}{C} = s^2 + 2s\omega_0\xi + \omega_0^2$$

Per tant:

$$K_P = 2C\xi\omega_0; K_I = C\omega_0^2$$

On C és la capacitat del condensador del costat de contínua, ξ el factor d'esmoreïment i ω_0 és la velocitat angular desitjada en el regulador.

I_{DCm} representa la potència entregada pel sistema d'energia renovable, en aquest cas una placa fotovoltaica, que es pot implementar de dues formes.

6.1.1. Emulació de la font d'energia

Com a simplificació del circuit es pot emular [5] una font d'energia com a una font d'intensitat contínua que es correspon amb la I_{DCm} del circuit de la figura 2, de manera que la potència generada per la placa fotovoltaica és equivalent al producte entre el voltatge del bus de contínua i la intensitat I_{DCm} .

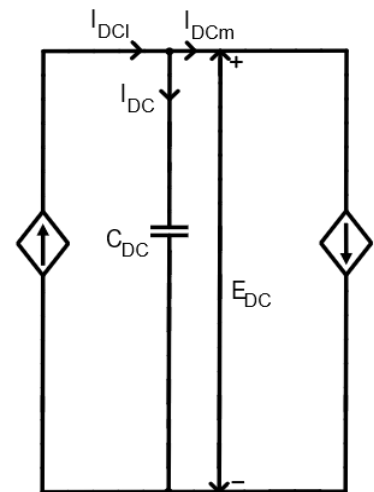


Fig. 6.1. Esquema de la part contínua del VSC emulant la placa fotovoltaica com a una font de corrent

Els resultats obtinguts al mantenir el senyal I_{DCm} constant són els esperats, tant la tensió de contínua com la de xarxa es mantenen constants en els valors introduïts després del temps necessari per a estabilitzar-se, i al ser la intensitat també una consigna constant, la potència intercanviada és constant i igual tant si es calcula com a el producte de la tensió de contínua i al corrent I_{DCI} com si es calcula pel costat d'alterna segons la següent fórmula:

$$P_{AC} = \frac{3}{2} v_{cq} i_{pvq}$$

Per a simular el pas d'un dia, en que el funcionament de la placa fotovoltaica dependrà de la irradiació solar que aquesta rebi, que alhora dependrà del temps i de la hora, es pot utilitzar una consigna variable per a la intensitat I_{DCm} . Es pren com a referència que durant un dia hi ha 8 hores de sol d'irradiació constant i la resta del dia és fosc, ja que així el control experimentarà el graó més pronunciat possible i es posarà a prova la seva capacitat per a estabilitzar el funcionament del convertidor. La consigna d'intensitat introduïda i els resultats obtinguts són els següents:

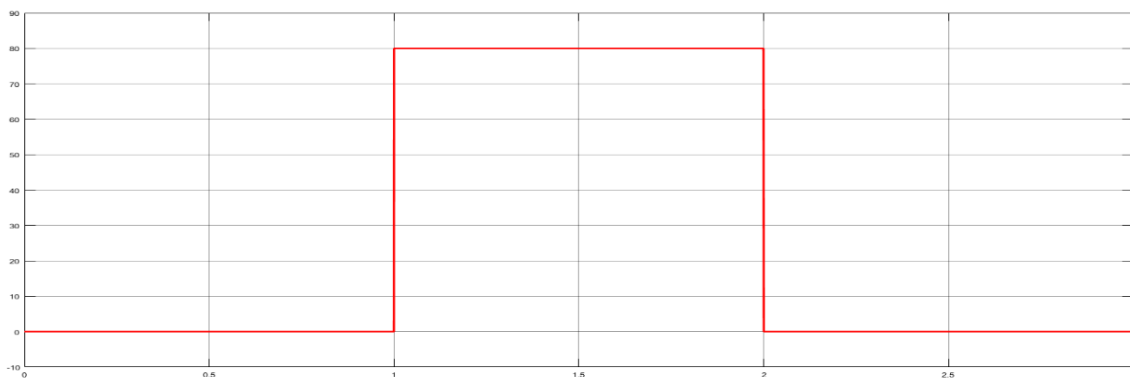


Fig. 6.2. Consigna de I_{DCm}

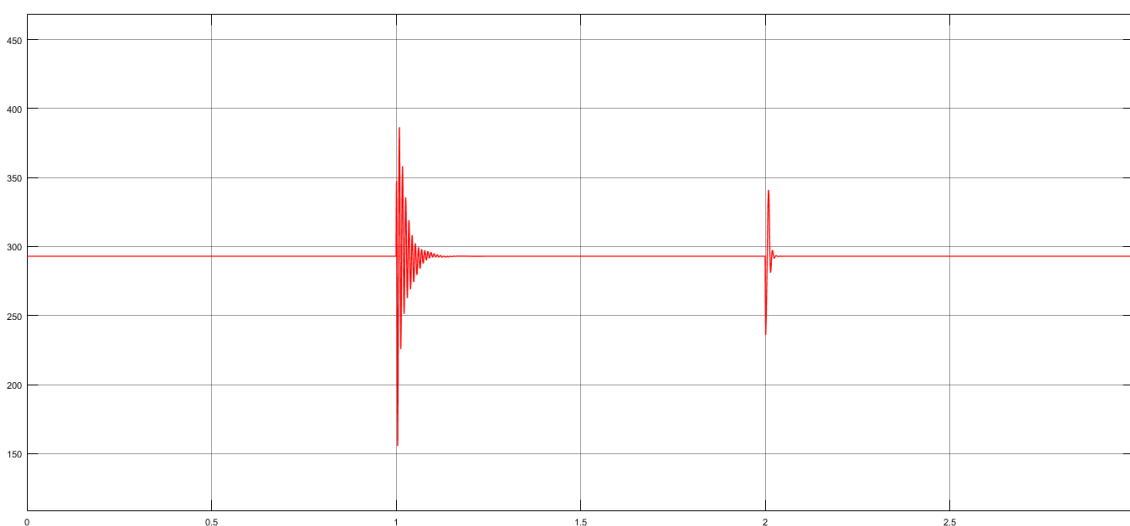


Fig. 6.3. Tensió de contínua

Es pot observar com les tensions de contínua i de xarxa es mantenen constants en els valors esperats excepte durant el temps que tarda en tornar a estabilitzar-se després d'un canvi bruscat en la consigna d'intensitat. La potència intercanviada també dóna els resultats esperats, i el seu valor en estacionari es correspon al valor teòric calculat amb les dues fórmules proposades anteriorment.

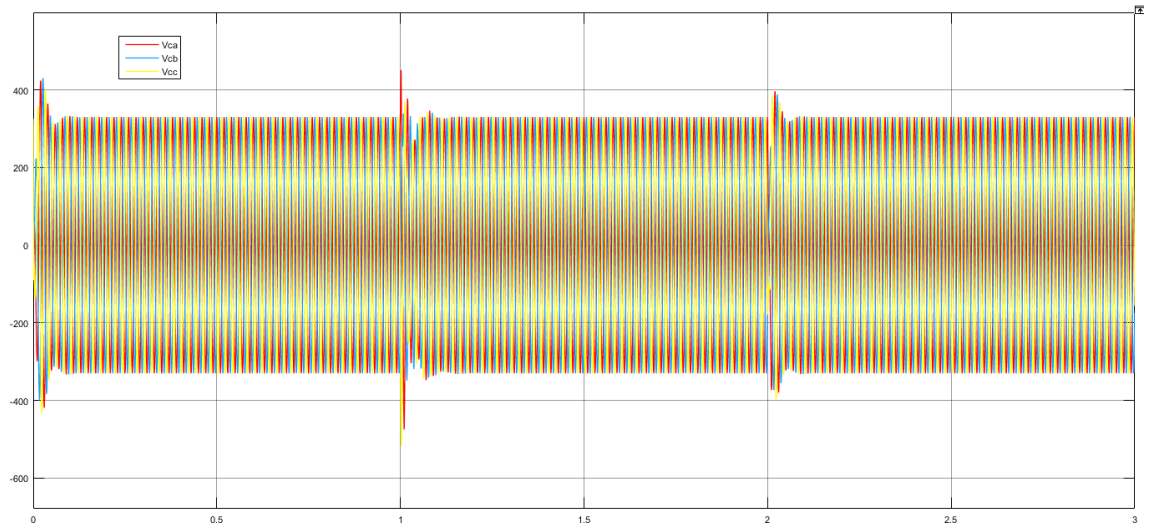


Fig. 6.4. Tensió de xarxa

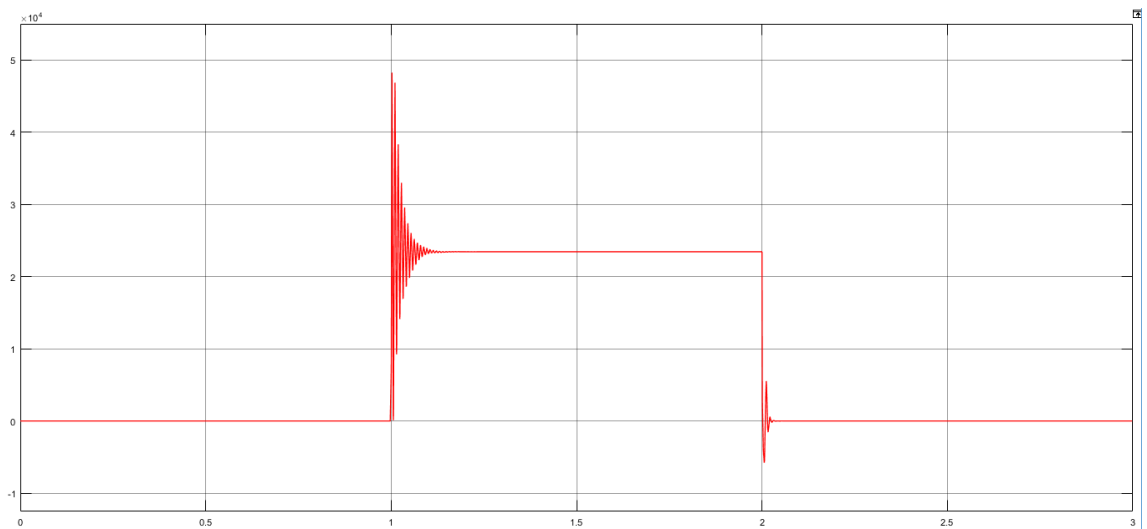


Fig. 6.5. Potència intercanviada

6.1.2. Bloc de la placa fotovoltaica

L'altra opció és la d'utilitzar el bloc de Simscape PV Array [9] per a obtenir la intensitat I_{DCm} que representa un conjunt connectat en paral·lel de cadenes de mòduls de cel·les fotovoltaïques col·locades en sèrie. Cada mòdul té, a més a més, un número determinat de cel·les col·locades en sèrie.

L'esquema bàsic d'una cel·la és el següent:

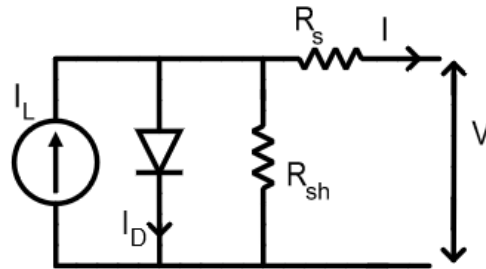


Fig.6.6. Esquema d'una cel·la fotovoltaica

Una cel·la fotovoltaica presenta una corba V-I en funció dels valors de les resistències, i entrega una potència del valor del producte de tensió i corrent, d'aquesta forma, en una cel·la entregarà potència depenent del punt de funcionament, que dependrà del valor de les resistències. Així doncs, cal escollir el valor de R_s i R_{sh} per a optimitzar la potència entregada:

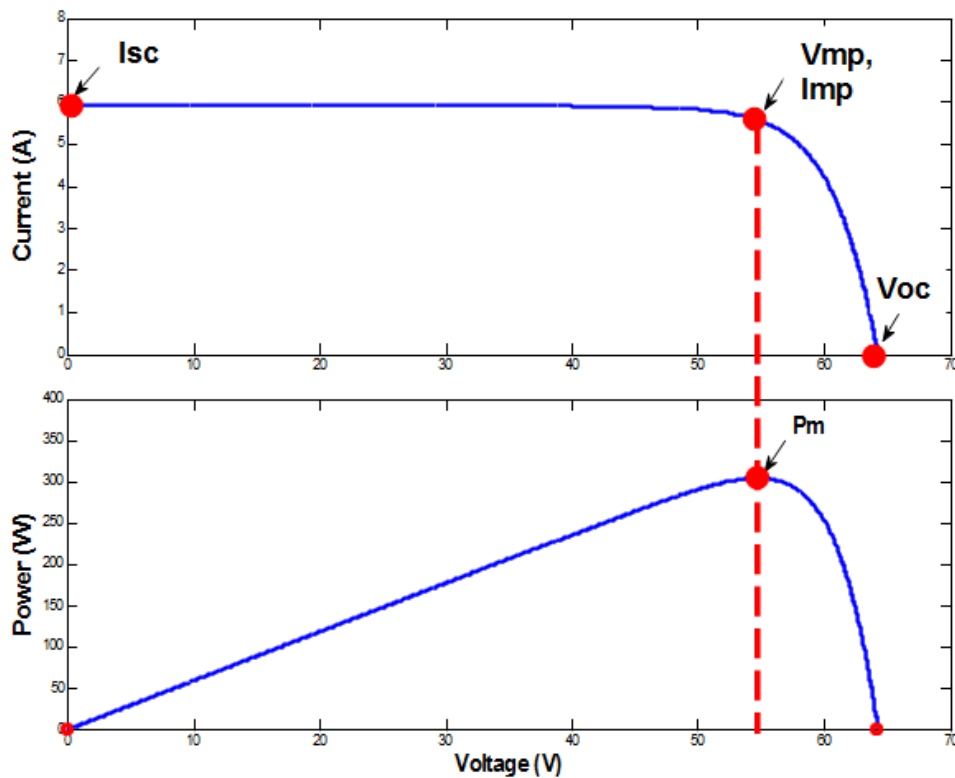


Fig.6.7. Gràfics I-V i P-V d'una cel·la

En el gràfic anterior, es pot veure com existeix un punt de funcionament on la potència, on és d'interès treballar. P_m és la potència màxima; V_{mp} i I_{mp} són, respectivament, la tensió i la corrent del punt on la potència és màxima; I_{sc} és el corrent de curtcircuit, quan $V=0$; i finalment, V_{oc} és la tensió de circuit obert, per $I=0$.

Per a un mòdul, les equacions de funcionament són les següents:

$$I_d = I_0 \left[e^{\left(\frac{V_T}{V_d}\right)} - 1 \right]$$

$$V_T = N_{cell} \frac{kT}{q} nI$$

On:

V_T és el voltatge d'un mòdul,

V_d és el voltatge del díode,

I_d és el corrent del díode,

I_0 és el corrent de saturació del díode,

nI és el factor d'idealitat del díode,

T és la temperatura de la cel·la (en K),

q és a càrrega d'un electró i

k és la constant de Boltzmann

El bloc PV Array té tres tipus de paràmetre, els paràmetres de formació, els paràmetres de mòdul i els paràmetres de model. Els paràmetres de formació són el número de mòduls en sèrie i en paral·lel que s'utilitzarà, els de mòdul es poden fixar escollint mòduls ja existents i els del model són fixats pel sistema per a assegurar que es treballa en el punt de potència màxima. Per tant, només cal escollir un mòdul i el seu nombre.

D'aquesta manera, cal tenir en compte com afectaran la col·locació en sèrie i en paral·lel a les consignes de E_{DC} i I_{DCm} . N_s és el número de blocs en sèrie i N_p en paral·lel:

$$E_{DC} = N_s V_T$$

$$I_{DCm} = N_p I$$

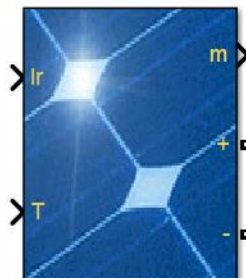


Fig. 6.8. Bloc PV Array

El bloc PV Array es connecta al costat de contínua del convertidor VSC mitjançant els terminals positiu i negatiu, mentre que com a entrades s'hi ha de proporcionar una temperatura (T) en $^{\circ}\text{C}$ i una irradiació (Ir) en W/m^2 . La sortida és un vector de 5 components (m) que conté la tensió i la corrent de sortida, la intensitat que recorre cada díode, la irradiació i la temperatura.

Per a simular, s'ha pres com a valor de temperatura una constant de 25°C i una irradiació de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ només en les hores de sol de forma similar a com s'havia simulat la placa amb una font de corrent, però en comptes de fer un graó la transició es farà amb una rampa per a simular millor la realitat on la llum augmenta gradualment.

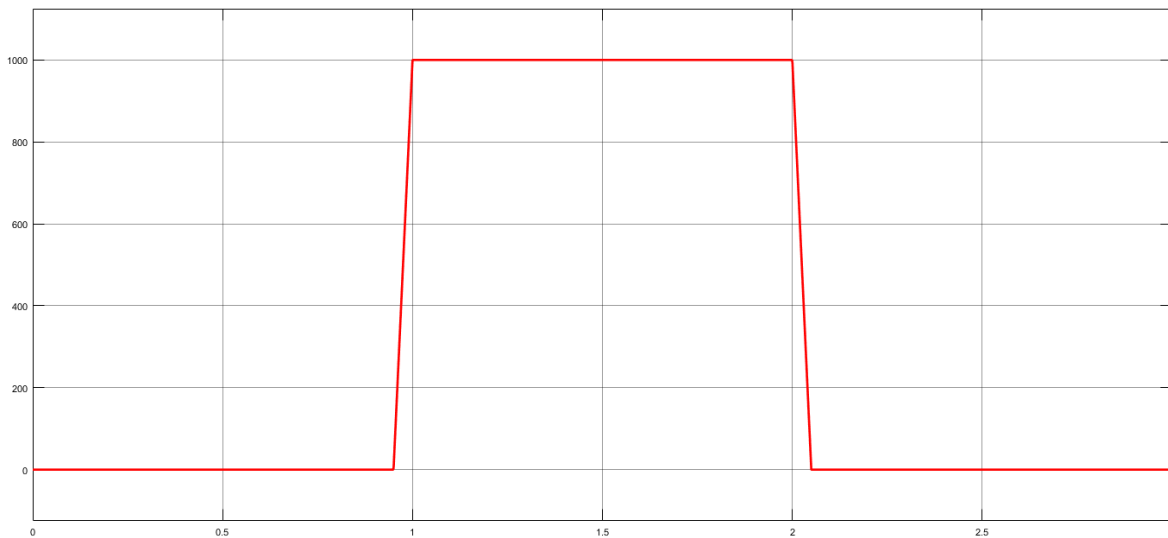


Fig.6.9. Consigna de la irradiació

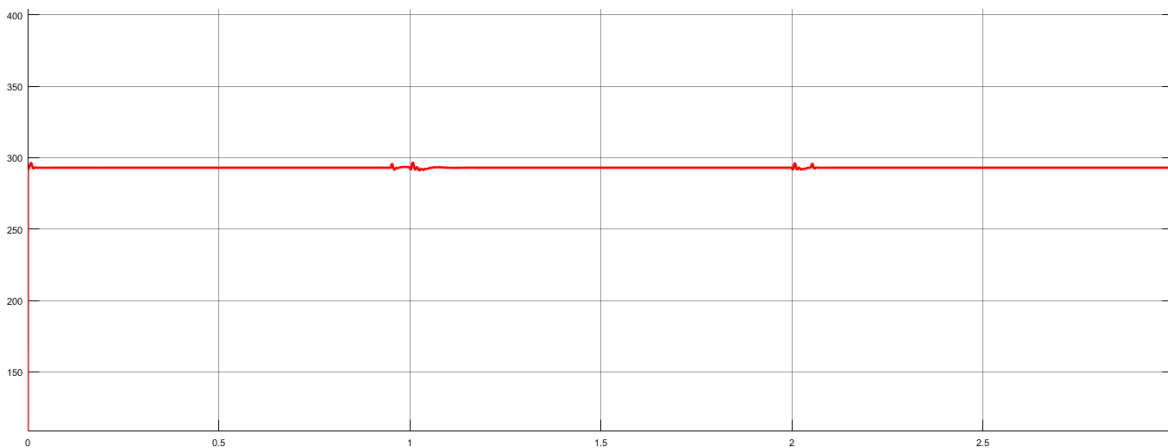


Fig.6.10. Tensió de contínua

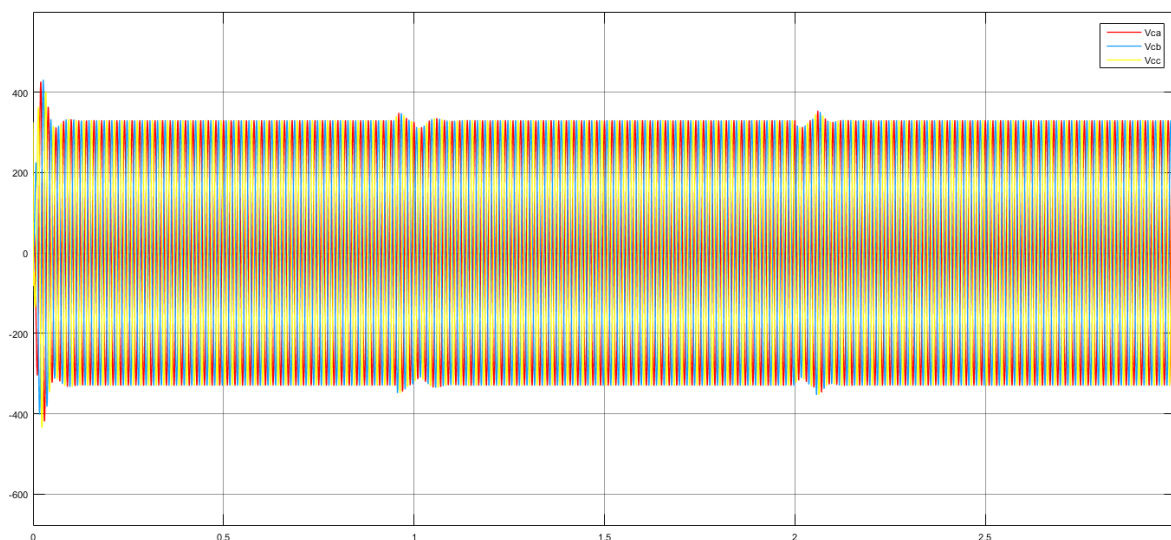


Fig. 6.11. Tensió de xarxa

Com es pot veure, la tensió de contínua es manté constant en el valor esperat i en aquest cas, degut a utilitzar una consigna amb rampa en comptes d'un graó, la estabilitat és millor que en el cas anterior.

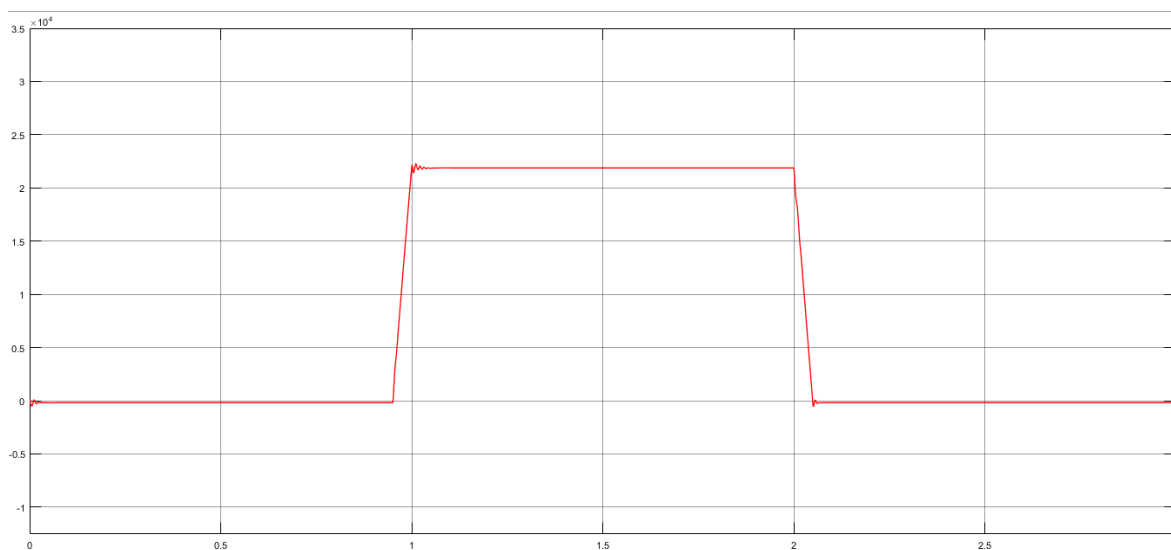


Fig. 6.12. Potència intercanviada

7. Bateria

Una bateria és un dispositiu format per una o més cèl·lules electroquímiques que permet emmagatzemar energia química que es pot transformar quan sigui necessari en energia elèctrica, i també permet recarregar-les subministrant energia elèctrica que s'emmagatzemarà com a energia química.

El consum d'una bateria és representat per la corrent que subministra i la seva capacitat és el total de càrrega que pot emmagatzemar, sovint mesurada amb unitats com l'Ampère per hora (Ah). La potència que subministra una bateria es calcula com al producte de la intensitat per la diferència de potencial entre l'ànode i el càtode de la bateria:

$$W = Pt = EIt$$

$$C = It = \frac{W}{E}$$

7.1. Modelització de la bateria

Una opció per a modelar la bateria és emular-la utilitzant només el costat d'alterna del convertidor VSC i utilitzar com a consigna de corrent una constant de signe variable o nul·la segons l'estat de funcionament de la bateria: càrrega, descàrrega i aturada. Aquest model, però, no permet tenir en compte l'estat de càrrega de la bateria, ni la seva capacitat total, de manera que s'hauria de crear una variable que ho representés.

L'altra opció és la d'usar el bloc de Simscape Battery [6], un bloc que té modelats tant les dinàmiques de càrrega com de descàrrega, permet implementar diferents tipus de bateria i té en compte l'estat de càrrega d'aquesta.

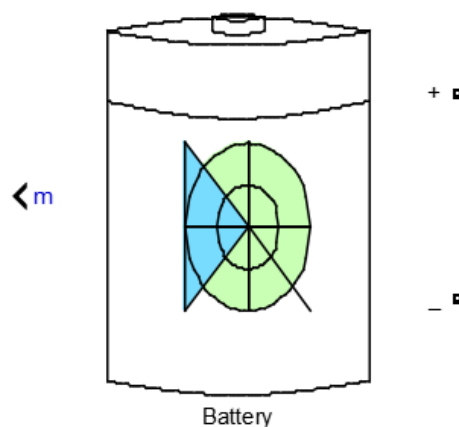


Fig.7.1. Bloc Battery

La bateria es connecta al costat de contínua del seu convertidor de la mateixa manera que s'ha connectat anteriorment la placa fotovoltaica. Com a sortida, el vector m té com a components les temperatures de l'ambient i de la cèl·lula (en °C), el corrent i la tensió de la bateria, i el seu estat de càrrega en percentatge.

Internament, el funcionament d'aquest bloc és el següent:

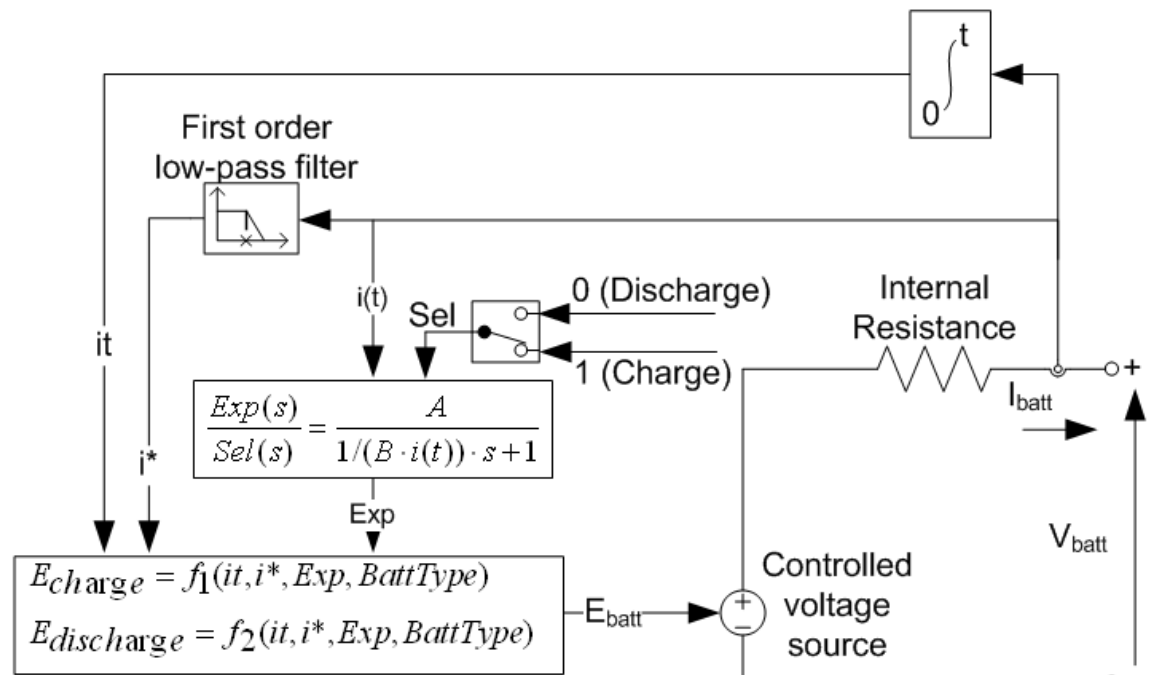


Fig.7.2. Funcionament intern del bloc Battery [6]

On les funcions f_1 i f_2 utilitzades per a calcular respectivament les tensions de càrrega i descàrrega depenen del model de bateria escollit entre un dels següents: de plom i àcid, d'ió liti, de níquel cadmi i de níquel-metall hidrur.

A més a més, els paràmetres a introduir són el voltatge nominal de la bateria, l'estat de càrrega inicial (SOC), la capacitat i el temps de resposta. A partir d'aquests paràmetres es poden calcular automàticament els paràmetres del model de descàrrega, com per exemple la intensitat de descàrrega nominal i la resistència interna.

Com anteriorment, en el cas de la implementació de la placa fotovoltaica, s'ha simulat la irradiació solar al llarg d'un dia sencer i el programa tardaria massa temps en dur a terme aquesta simulació, s'ha dividit el temps real per un factor X per a estalviar temps.

Això és d'especial importància al implementar la bateria, ja que alguns paràmetres tals com la capacitat i, evidentment, el temps de resposta depenen del temps, i també s'hauran de dividir per aquest factor X. Aleshores, hi ha dues opcions; la primera de les quals és introduir els paràmetres reals i fer que el programa calculi els paràmetres de descàrrega a partir d'aquests i finalment dividir els paràmetres capacitat i temps de resposta pel factor X; i l'altra opció és calcular els paràmetres de descàrrega després d'haver aplicat aquest factor, i després multiplicar per X la intensitat i dividir per X la resistència interna, ja que aquests factors es calculen en funció de la capacitat però són independents del temps.

En els annexos es poden trobar les pantalles de diàleg on s'introdueixen els paràmetres del bloc Battery.

7.2. Control del convertidor

Com en els casos anteriors, la base del control és l'aplicació de la segona llei de Kirchhoff entre les tensions d'alterna del convertidor i les tensions dels condensadors de la xarxa per a obtenir la primera a partir de les intensitats que recorren la part d'alterna del convertidor.

La obtenció de la consigna de la component q de la intensitat de la banda d'alterna és el que diferencia el control de la bateria de la resta.

En aquest cas, aquesta consigna s'obté a partir de la intensitat de contínua del convertidor I_{DCI} , que s'implementarà com a una constant que canviarà de signe o serà nul·la en funció de l'estat de funcionament de la bateria, igualant les potències d'alterna i contínua del convertidor.

$$P_{AC} = P_{DC}$$

$$P_{AC} = \frac{3}{2} v_{cq} i_{pvq}$$

$$P_{DC} = E_{DC} I_{DCI}$$

$$i_{Bq} = \frac{2}{3} \frac{E_{DC} I_{DCI}}{v_{cq}}$$

En aquest cas no és necessari utilitzar un controlador PI, ja que la consigna d'intensitat només podrà prendre tres valors diferents que s'aniran alternant.

7.2.1. Control de l'estat de funcionament

Com ja s'ha assenyalat anteriorment, el control de la bateria no es realitzarà amb un controlador PI, com en casos anteriors i com en el current loop, sinó que s'alternarà entre els tres possibles estats de funcionament modificant el sentit de la corrent I_{DCI} , positiva per a càrrega, negativa per a descàrrega i nul·la quan la bateria està aturada.

El funcionament alternarà en funció de l'estat de càrrega de la bateria i de la irradiació solar que rep la placa fotovoltaica segons els següents criteris:

- Carrega la bateria quan hi ha irradiació i l'estat de càrrega està per sota del màxim.
- Descarrega la bateria quan no hi ha irradiació i quan l'estat de càrrega està per sobre del mínim estipulat.
- Està aturada quan no es compleixen les condicions anteriors.

D'aquesta manera, per a decidir si està en funcionament o no (ja sigui de càrrega o de descàrrega), s'utilitza una funció binària del següent tipus:

$$F = f(c, i)$$

- F (funcionament), 1 quan està en marxa i 0 quan no
- c (estat de càrrega), canvia a 1 quan sobrepassa el límit superior i a 0 quan supera el límit inferior (comença en 1)
- i (irradiació), 1 quan hi ha irradiació i 0 quan no

Així doncs, s'obté la funció a partir de la taula de la veritat:

c	i	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Fig. 7.3. Taula de la veritat de F

$$F = f(c, i) = c \oplus i$$

Apart d'aquesta funció, també cal diferenciar quan el funcionament consisteix en càrrega o en descàrrega, canviant el signe del corrent de la part de contínua del VSC en funció d'això.

Així doncs, es multiplicarà la variable F per -1 o 1 segons l'estat de càrrega, sent -1 per a descàrrega, quan l'estat de càrrega superi el límit superior; i 1 per a carregar-la, quan l'estat de càrrega baixi per sota del mínim.

Aquesta nova variable és multiplicarà per a una constant positiva de valor de la intensitat de descàrrega de la bateria, generant així la consigna de corrent continu que s'usarà per a obtenir la consigna de la component q de la intensitat de la banda d'alterna de l'inversor.

7.3. Prova de funcionament

Per a la mateixa consigna d'irradiació utilitzada en la prova de funcionament del bloc PV Array, els resultats obtinguts són els següents:

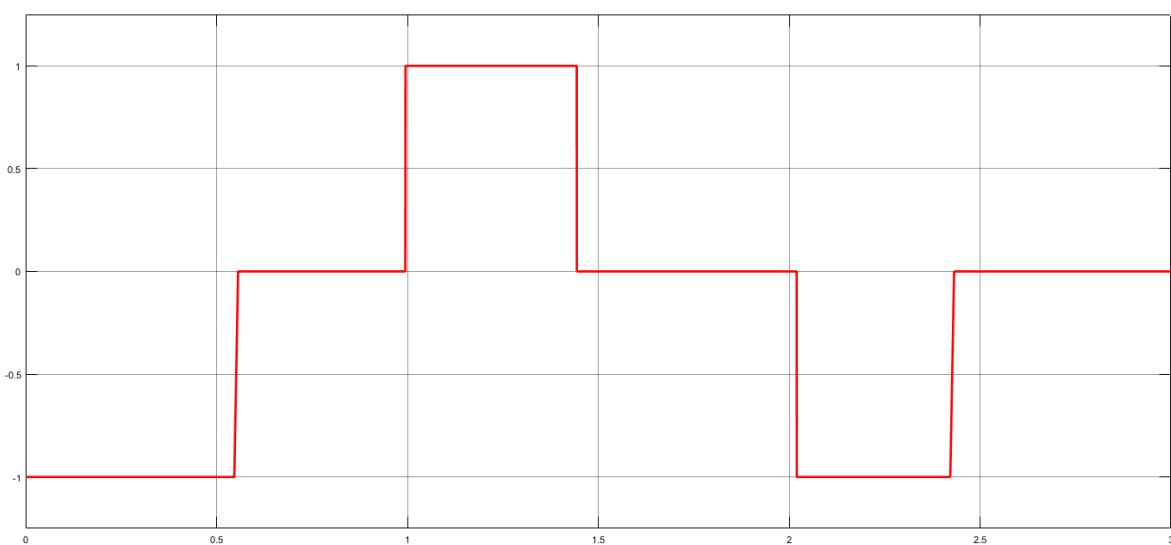


Fig. 7.4. Consigna de control de l'estat de funcionament

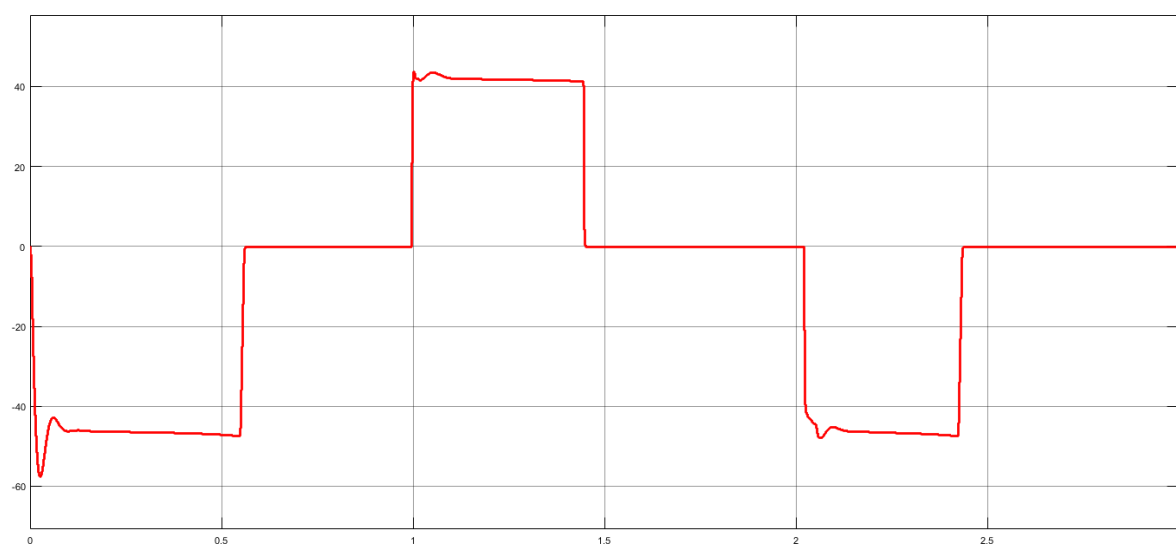


Fig. 7.5. Senyal del corrent de contínua

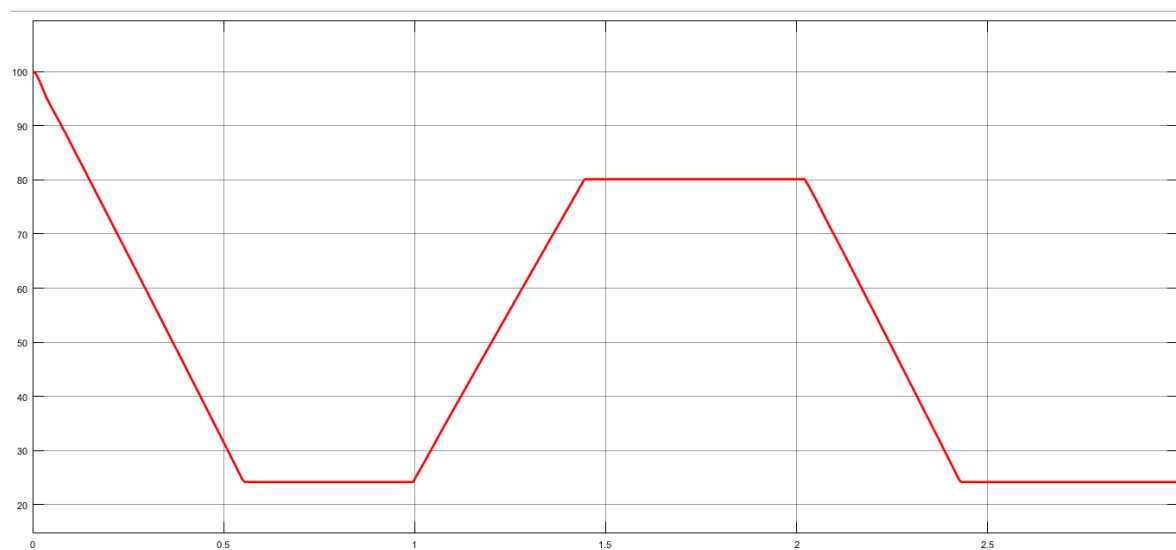


Fig. 7.6. Estat de càrrega al llarg de la simulació

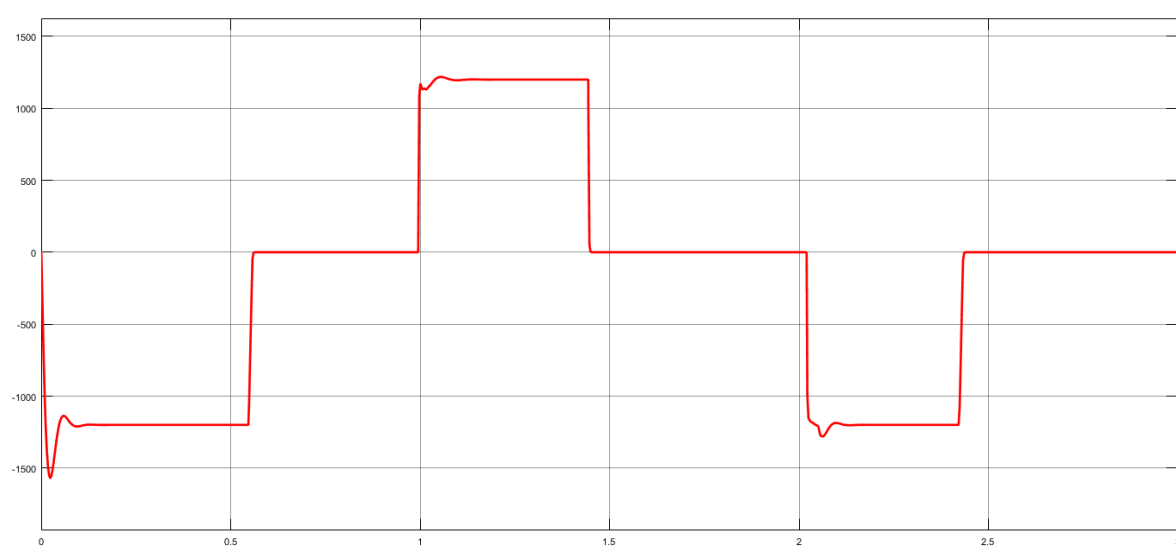


Fig. 7.7. Potència intercanviada pel convertidor

Tal com es pot observar, el control de l'estat de funcionament es comporta de la forma que s'esperava i a més a més, el senyal d'intensitat de contínua funciona de forma similar a la de la consigna.

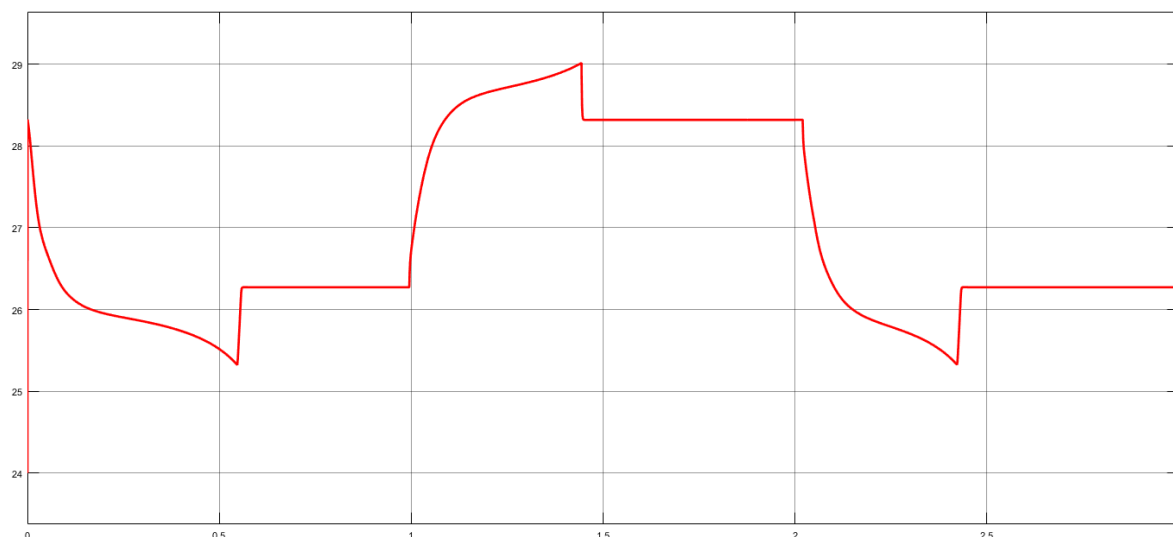


Fig. 7.8. Senyal de tensió de contínua

Com es pot veure, la tensió de contínua no és contínua tal com deia la hipòtesis utilitzada per a calcular la consigna de q del corrent d'alterna, però també s'observa que la variació és petita, de forma que és un error que es pot negligir.

8. Segona generació de xarxa

Per a implementar el segon generador de xarxa, es connecta la banda d'alterna d'un inversor VSC i les capacitats a la xarxa de manera similar a figura 5.1, tot i que en aquest cas no cal afegir més càrregues.

A més a més, també s'han d'implementar resistències i inductàncies en la xarxa trifàsica entre aquesta segona generació de xarxa i la resta de la microxarxa, i es dimensionarà per a emular les pèrdues degudes a les conductivitats dels cables, que en aquest cas no són negligibles, ja que la distància és molt superior a les distàncies entre la resta de dispositius que es troben en la mateixa localització.

El control del segon generador es controla de forma idèntica al primer generador (explicat en el capítol 5).

8.1. Distribució de potència

El motiu per a implementar un segon generador de potència, és per a augmentar la flexibilitat de la microxarxa, podent alimentar-la des de una posició allunyada en funció de les circumstàncies o modificar la fracció de potència que s'extreu de cada generador; augmentant així també la seguretat de la microxarxa, que al tenir dues fonts d'alimentació podria continuar funcionant en cas d'averia d'una d'elles.

8.1.1. Estudi de la distribució

S'estudia la distribució de potència entre els generadors simulant el nou sistema amb el segon generador i sense la bateria del capítol 7, per motius de temps (ja que la duració de la simulació augmenta de forma desproporcionada quan aquesta forma part de la simulació) i degut a que el tamany de la bateria és relativament petit en comparació amb la resta de dispositius (la placa fotovoltaica entrega al voltant de 20kW mentre que la bateria n'entrega només 1kW) i tal com s'ha observat anteriorment, la bateria només modifica els valors de potència intercanviats lleugerament mentre aquesta està activa, tant en càrrega com en descàrrega.

Com es pot observar, els valors de les tensions dels condensadors dels generadors de xarxa corresponen als valors de les consignes i el sistema funciona de forma esperada:

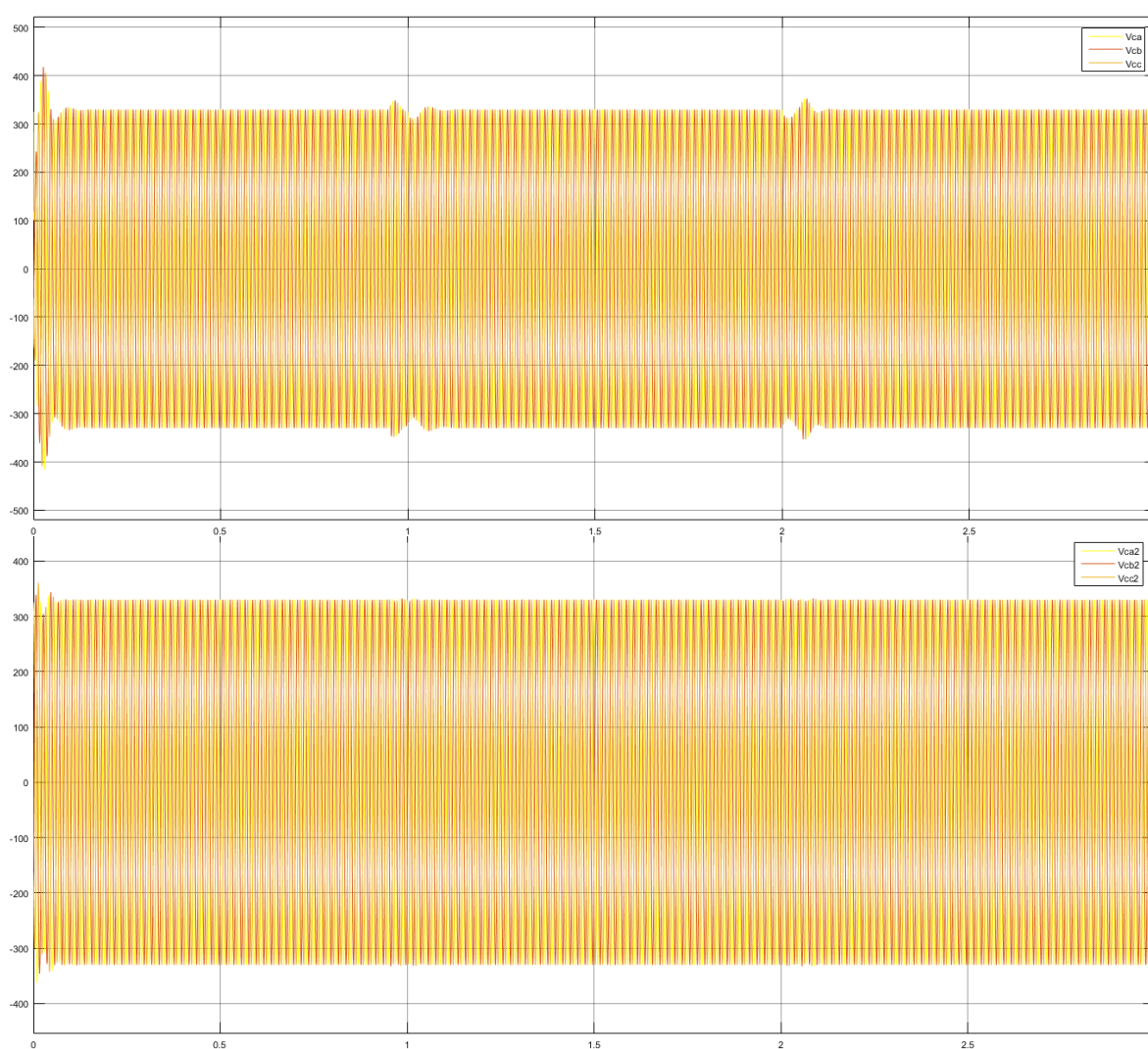


Fig.8.1. Senyals de les tensions de xarxa en referencia abc

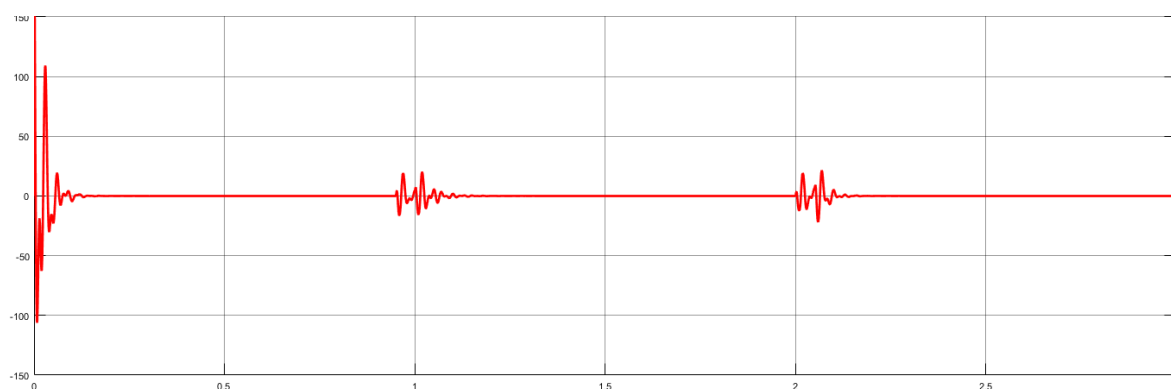


Fig.8.2. Diferències entre les components 'a' de les tensions de xarxa

En canvi, respecte a les distribucions de potència, es pot veure com s'extreu tota la potència necessària per a alimentar la xarxa del primer generador, mentre que el segon només treballa per a estabilitzar el sistema quan es produeix una pertorbació, en aquest cas canvis en la irradiació que rep la placa fotovoltaica (si la bateria estigués en marxa també hi hauria pertorbacions quan la bateria canvia l'estat de funcionament).

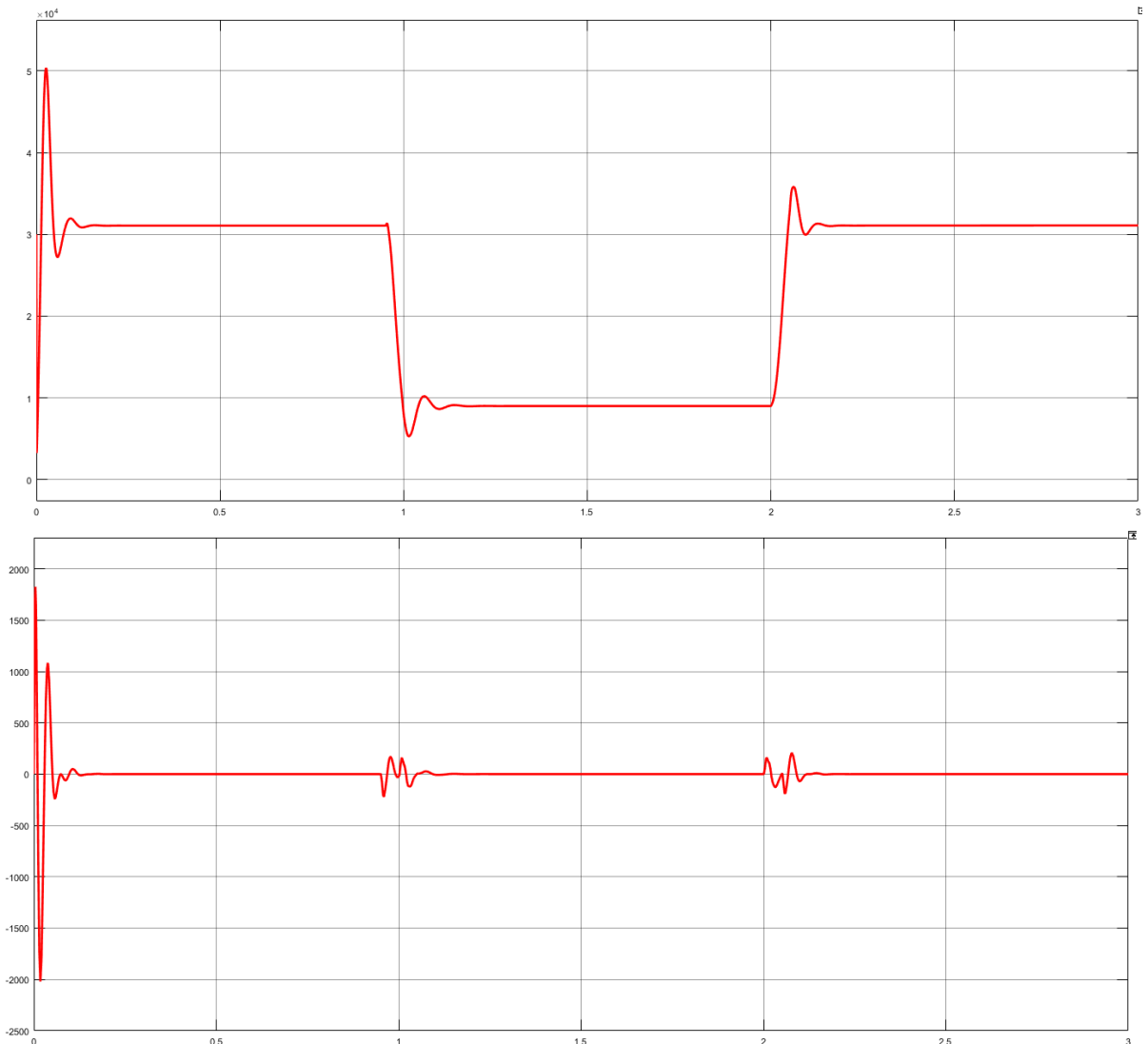


Fig.8.3. Potències entregades pel primer i el segon generador respectivament

Que el segon generador no entregui potència es deu a que al fixar la mateixa tensió de xarxa, es força que la intensitat que va del segon generador a la resta de la microxarxa sigui nul·la, anul·lant així també la potència entregada per aquest.

Això es pot solucionar, per exemple, col·locant la càrrega a mig camí entre els dos generadors, col·locant resistències i inductàncies també entre la càrrega el segon generador, i entre la càrrega i la resta de la microxarxa.

En aquest cas, la segona font entrega de forma constant 5kW, i que la distribució de potència canvia en funció de la distribució de càrregues i la seva posició, però, per exemple, al afegir càrregues, evidentment també augmentarà el consum.

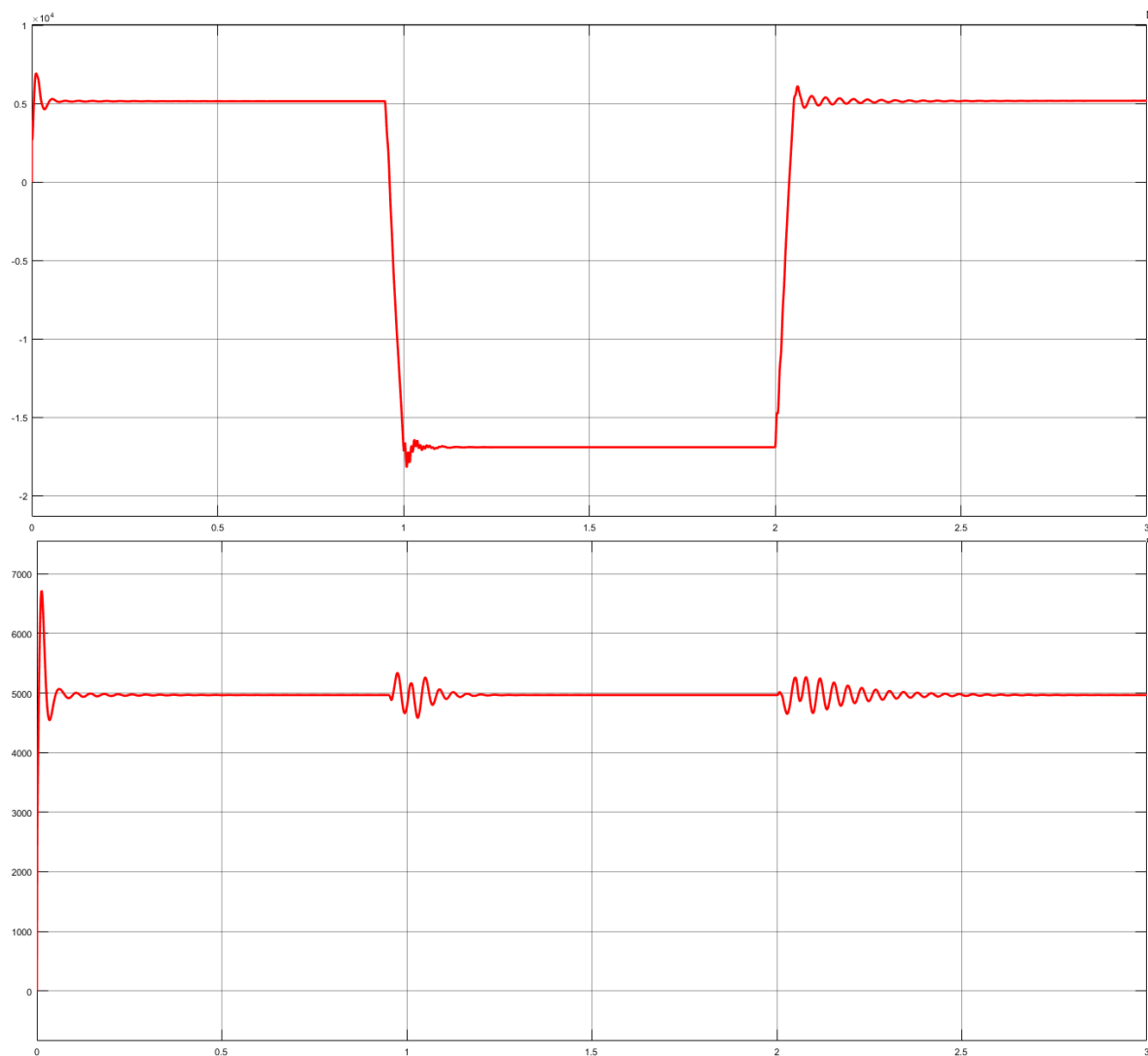


Fig. 8.4. Diferent distribució de potències

8.2. Droop de freqüència

Com s'ha vist en el cas anterior, no és possible controlar el repartiment de la potència generada, ja que al situar la placa fotovoltaica en la mateixa localització que un dels generadors de xarxa, envia tota la potència cap a aquesta i la xarxa en consumeix tota la potència necessària d'aquesta quan no hi ha irradiació degut a la diferència de pèrdues elèctriques que es produiria en cada cas.

També, en cas de situar-la en una localització intermèdia entre els dos generadors, el repartiment dependria sempre de la distància i dels valors de les càrregues, de manera que tampoc es podria repartir la potència de forma controlada.

Per a repartir la distribució de potència segons es vulgui, s'ha d'utilitzar un droop de freqüència [7], que utilitza la freqüència com a senyal de control per a la distribució de potència activa.

El principi de funcionament consisteix en modificar les freqüències a les que alternen les variables elèctriques de cadascun dels controls dels generadors de xarxa de forma que s'altera la distribució de potència intercanviada per cadascuna de les fonts. En un sistema en equilibri, les freqüències dels dos generadors convergiran al mateix valor (generalment diferent als valors inicials de freqüències) al arribar a l'estat estacionari, on la distribució és la desitjada.

En aquest cas, s'utilitzen com a senyal de control dels generadors de xarxa el voltatge dels condensadors en la referència de Park imposant V_{cq} com al valor de pic de la tensió desitjada i forçant que la component d (V_{cd}) sigui nul·la de manera que al realitzar la transformada de Park per a obtenir la senyal de tensió real per a realimentar el voltage loop comparant-la amb la consigna, es forci que la freqüència utilitzada sigui la del sistema.

La resta de transformades es realitzaran cadascuna utilitzant la freqüència consignada per el droop, mentre que en el cas de les plaques fotovoltaïques i les bateries, s'obtindran la velocitat angular i l'angle elèctric reals amb un PLL.

Els desacoblaments es realitzaran amb la velocitat angular inicial per a simplificar el funcionament del sistema, ja que la variació de freqüència ha de ser petita per a assegurar que el sistema no s'inestabilitzi.

Les equacions utilitzades en el droop per a calcular les freqüències són les següents:

$$\omega_i^* = \omega_{0i}^* - K_i P_i$$

$$\theta_i^* = \frac{1}{s} \cdot \omega_i^*$$

On ω_i^* i θ_i^* són respectivament els valors de velocitat angular i d'angle elèctric que s'imposaran a cadascun dels generadors de xarxa, ω_{0i}^* són les velocitats angulars inicials de cada generador. P_i és la potència activa real intercanviada pels convertidors dels generadors i K_i és una constant que imposa la distribució que s'obtindrà.

Les K_i s'han fixar de manera que no modifiqui de forma excessiva la freqüència, si aquesta és massa gran; i de que la modificació sigui suficientment gran per a ser significativa. D'aquesta manera, cal tenir en compte els valors de potència esperats per a fixar una constant que faci que l'ordre de magnitud del seu producte estigui en els voltants d'un 5% dels valors de les freqüències inicials.

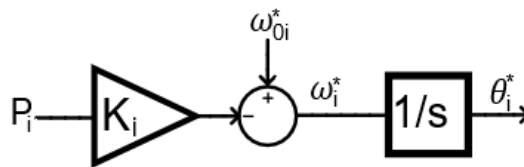


Fig.8.5. Diagrama de blocs del droop

Per falta de temps i per problemes de dimensionament, que obligarien a replantejar tot el sistema, no s'ha pogut trobar cap valor per a les constants K_i que facin que les freqüències i les potències intercanviades convergeixin en un mateix punt:

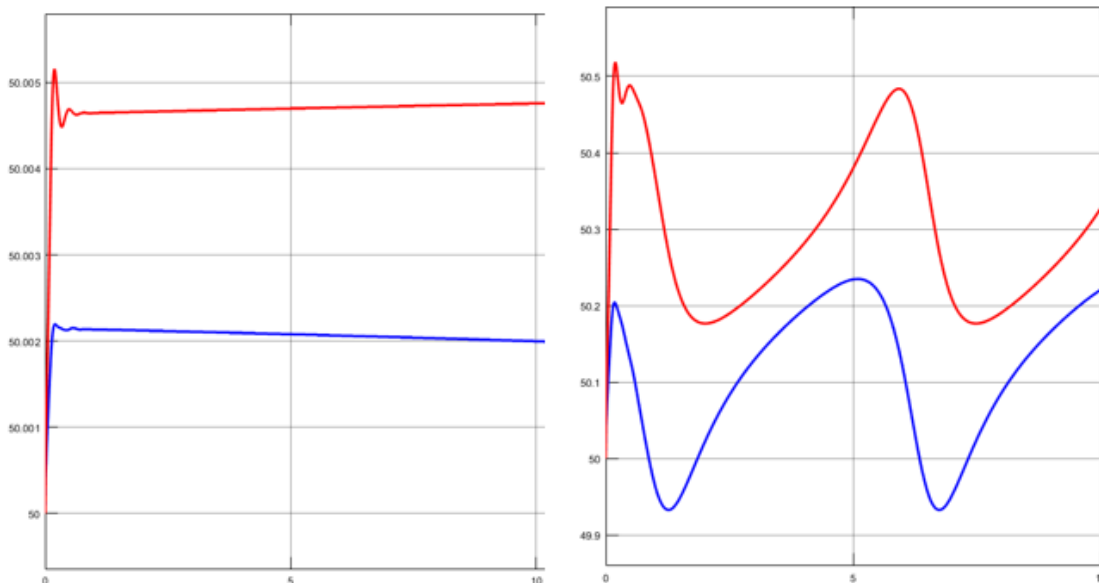


Fig.8.6. Exemples de la modificació de la freqüència

9. Dimensionament

Magnitud	Descripció	Valor	Unitats
V_{Cq}	Valor de pic de la tensió de xarxa	330	V
f_n	Freqüència nominal	50	Hz
R	Resistència de la part d'alterna de tots els VSC	0,5	Ω
L	Inductància de la part d'alterna de tots els VSC	5,4	mH
R_c	Resistència de les càrregues	5,29	Ω
r_p	Resistència de pèrdues entre els generadors	0,01	Ω/km
l_p	Inductància de pèrdues entre els generadors	2	mH/km
C	Capacitat dels condensadors de xarxa	$6,2544 \cdot 10^{-5}$	F
C_{DC}	Capacitat del condensador de contínua	0,001	F
τ_i	Constant de temps del current loop	0,001	s
τ_v	Constant de temps del voltage loop	0,005	s
ξ	Factor d'esmoreïment	0,707	-
ω_0	Freqüència del control de tensió DC del PV	418,88	rad/s
N_s	Número de mòduls PV en sèrie	10	-
N_p	Número de mòduls PV en paral·lel	10	-
E_{DC_PV}	Tensió de contínua del PV	290	V
I_r	Irradiació solar mitjana	1000	W/m^2
T	Temperatura PV	25	$^{\circ}\text{C}$
CB	Capacitat de càrrega de la bateria	250	Ah
E_{DC_Bat}	Tensió de contínua de la bateria	24	V

Fig.9.1. Taula de valors

En la taula 9.1. es troben els valors que s'han de fixar per a simular el funcionament de la microxarxa, tant siguin paràmetres de diferents components del circuit, com les consignes utilitzades.

El valor de pic de la tensió de xarxa i la seva freqüència s'han fixat respectant els valors de les xarxes elèctriques europees, 330V i 50Hz.

Els valors de resistències i inductàncies dels costats d'alterna dels VSC, la capacitat dels condensadors de contínua i els valors dels paràmetres que fixen el comportament dinàmic dels controladors dels current loop i del control de tensió de contínua i del PLL s'han extret de [2].

La capacitat dels condensadors s'obté tenint en compte que la X_L del costat d'alterna del VSC és 0,2 vegades la X_b i la X_C és 6 vegades la X_b , segons [8]. D'aquesta manera:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 0,2X_b$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = 6X_b$$

$$C = \frac{1}{5 \cdot 6 \cdot (2\pi f)^2 L}$$

La distància entre els dos generadors és de 300m i s'hi posa una càrrega en un punt intermedi a 200m de les plaques fotovoltaïques per a repartir el flux de potència, s'utilitzen també els valors de [8] per a modelar les pèrdues.

Per motius d'estabilitat, s'afegeixen resistències i inductàncies entre els generadors ideals i la càrrega central, que s'afegeixen a les residències i inductàncies dels cables. Es fa que es mantinguin les proporcions degudes a la distància de manera que 2/3 de la resistència i la inductància es trobin entre la microxarxa i la càrrega i 1/3 entre la càrrega i l'altre generador. D'aquesta manera:

$$R_{T1} = R_1 + r_p d_1 = R_1 = 0,5\Omega$$

$$R_{T2} = R_2 + r_p d_2 = R_2 = 0,25\Omega$$

$$L_{T1} = L_1 + l_p d_1 = L_1 = 0,1H$$

$$L_{T2} = L_2 + l_p d_2 = L_2 = 0,05H$$

Els valors introduïts en el bloc PV Array són aquells de la placa 1Solstech 1STH-220-P, que es pot seleccionar com a una de les opcions predeterminades. El número de mòduls de plaques en sèrie i en paral·lel és 10x10, de manera que el valor de la tensió de contínua de la placa fotovoltaica serà el valor de tensió d'un sol mòdul multiplicat per N_s .

Els valors de temperatura i irradiació són els valors mitjans registrats en forma simplificada, la T és constant, mentre que la I_r és constant durant les hores de pic (8h/dia) i nul·la durant la resta [10].

Per als valors de la bateria s'han agafat aquells de la bateria comercial més gran que s'ha trobat en una ràpida recerca a internet [11]. Cal tenir en compte que al modificar l'escala de temps s'han de modificar els valor de la capacitat tal com s'explica en l'apartat 7.1.

La constant de temps del voltage loop es pren tenint en compte que la dinàmica del current loop ha de ser més ràpida, per tant ha de ser superior a la d'aquest.

10. Estudi de viabilitat

10.1. Estudi econòmic

L'assignatura del Treball de Final de Grau consta de 12 crèdits, i per a cada crèdit es recomanen 30 hores de treball, de manera que el total de hores dedicades ha estat de 360, que per a un enginyer de pràctiques no graduat es paguen 6 €/h.

El cost de la llicència del programa MATLAB incloent Simulink per a estudiants és de 70€ per any, tot i que el treball ha durat uns 5 mesos, com no hi ha plans per a seguir amortitzant el preu del programari, es comptabilitzarà tot el cost anual.

Per als trasllats s'ha adquirit una targeta de metro T-Trimestre (142€) i una T-50/30 (42,50€).

CONCEPTE	COST (€)
MÀ D'OBRA	2160
VIATGES	184,5
PROGRAMARI	70
TOTAL	2414,5
TOTAL+IVA	2921,55

Fig. 10.1. Taula de pressupostos

10.2. Estudi d'impacte ambiental

Al tractar-se el treball d'una simulació, no l'impacte ambiental queda reduït a l'electricitat utilitzada per a carregar l'ordinador i als trasllats per anar a treballar, però al haver-se fet amb transport públic també són negligibles, ja que de no haver-se fet aquest seguiria funcionant igualment.

11. Anàlisi de resultats

Finalment, havent descartat utilitzar el droop de freqüència de l'aparat 8.2, s'implementa la microxarxa separant 300m els dos generadors i es posa una segona càrrega entre ells, a 100m del generador aïllat i a 200m de la resta de la xarxa.

La simulació s'atura poc abans de completar-se ja que el programa es bloqueja al acabar i no deixa obtenir els resultats per a treballar.

11.1. Generació de xarxes i distribució de potències

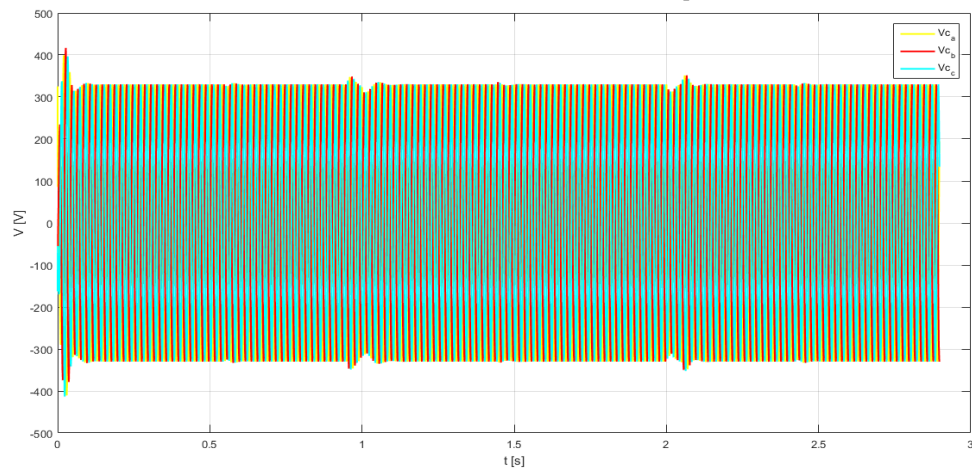


Fig. 11.1. Senyal de tensió de xarxa del primer generador

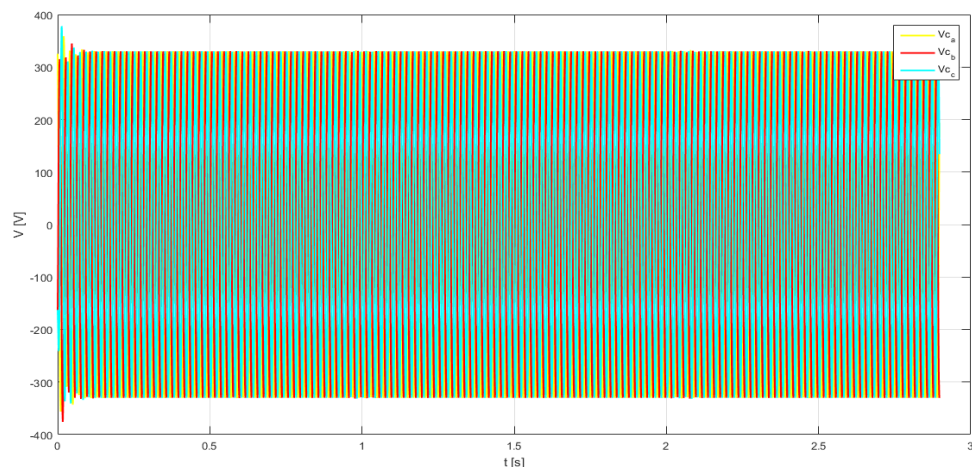


Fig. 11.2. Senyal de tensió de xarxa del segon generador

Tal com es pot observar, la tensió obtinguda en els condensadors on es formen les xarxes és la que s'introdueix com a consigna i es comporten de la forma esperada.

A més, les pertorbacions de irradiació i canvis d'estat de la bateria afecten molt més al primer generador de xarxa degut a la major proximitat respecte a la bateria i a la placa fotovoltaica que la segona.

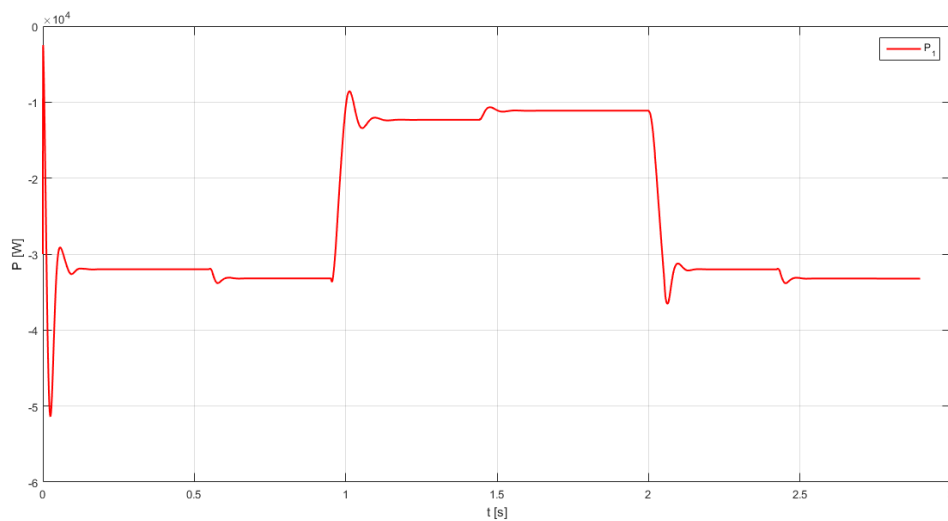


Fig. 11.3. Potència entregada pel primer generador

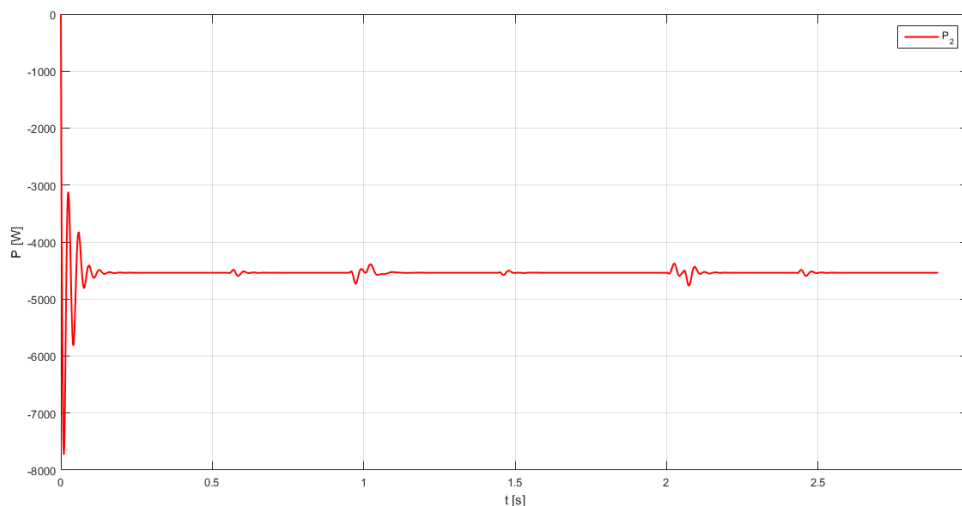


Fig. 11.4. Potència entregada pel segon generador

La distribució de potències és semblant a la obtinguda en l'apartat 8.1 ja que el tamany de la bateria és petit comparat a la resta de components. Degut a la distribució de les càrregues s'aconsegueix que la potència entregada pel segon generador sigui constant durant la simulació, però per a aconseguir una distribució diferent caldria o modificar el circuit o implementar un droop de freqüència funcional.

La resta de bloc funcionen de forma molt similar al seu funcionament ja explicat en els seus respectius apartats.

11.2. Placa fotovoltaica

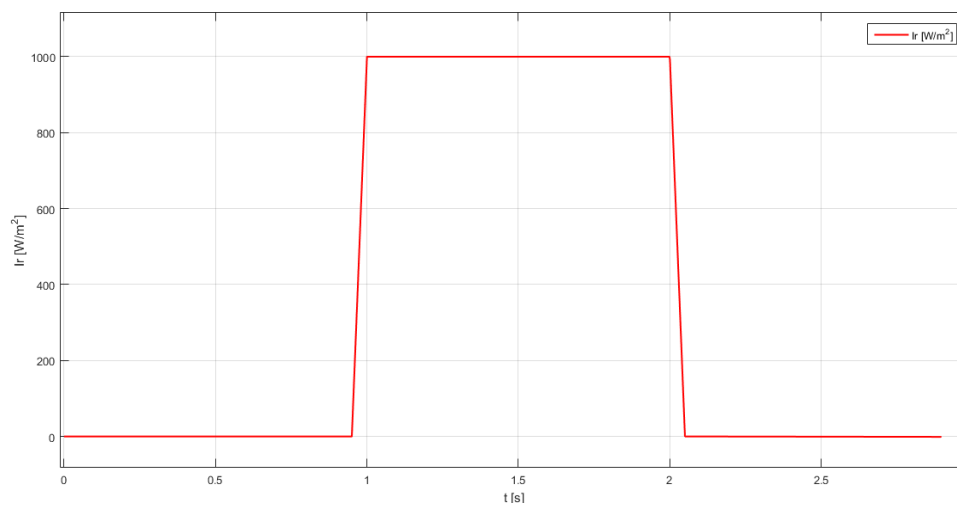


Fig. 11.5. Senyal d'irradiació

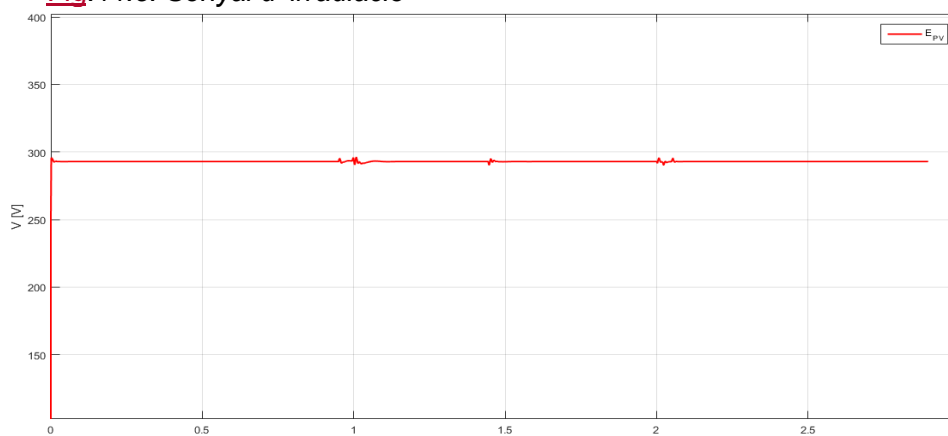


Fig. 11.6. Tensió de contínua de la PV

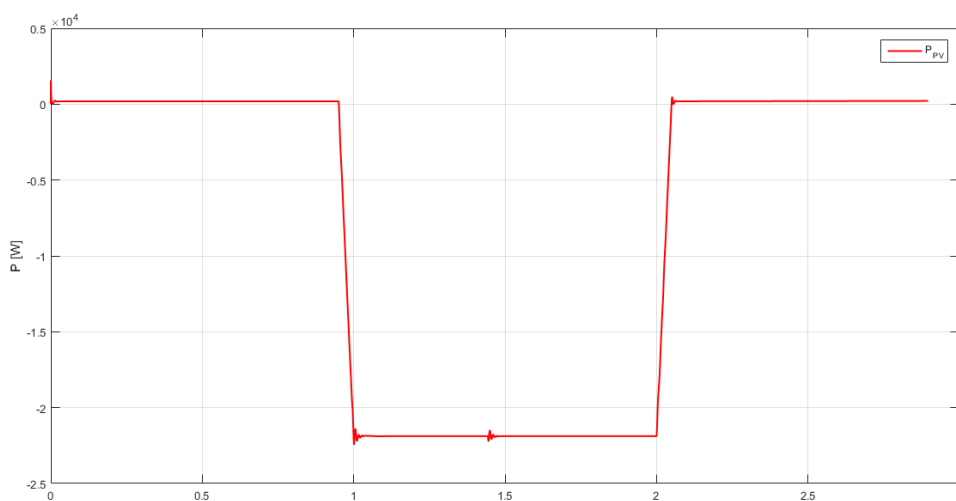


Fig. 11.7. Potència entregada per la placa fotovoltaica

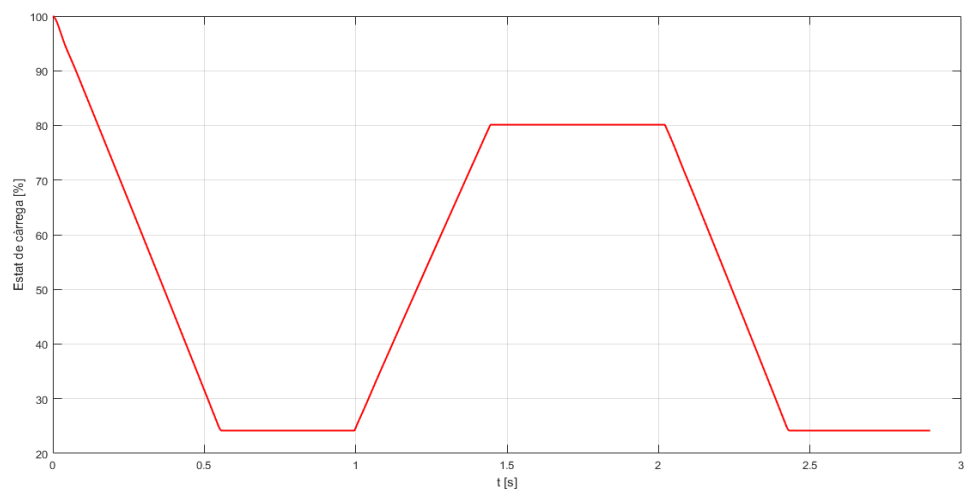


Fig. 11.8. Estat de càrrega de la bateria

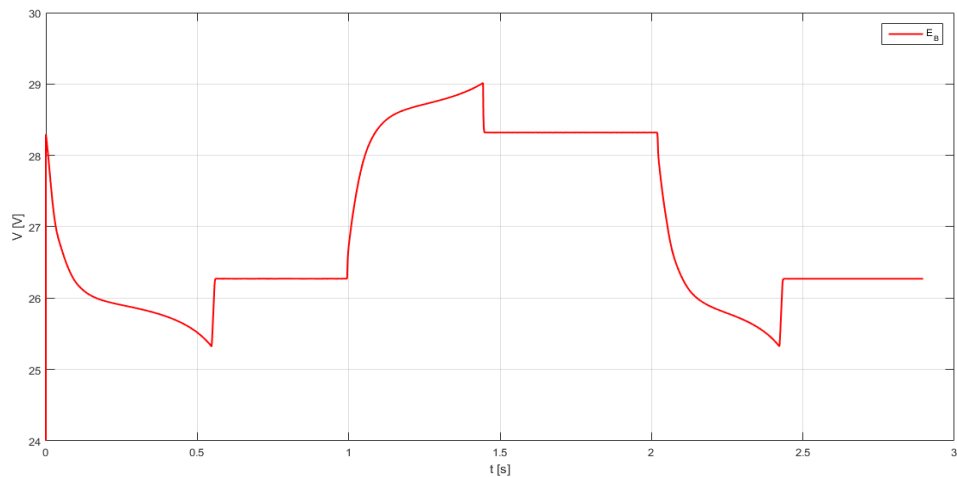


Fig. 11.9. Tensió de contínua de la bateria

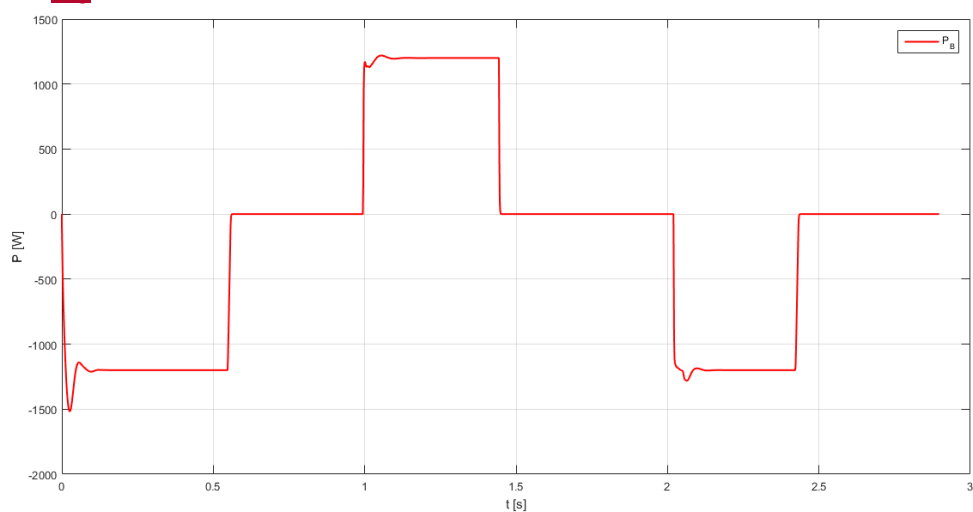


Fig. 11.10. Potència intercanviada per la bateria

Conclusions

Analitzant el funcionament de la microxarxa, es veu com aquesta es comporta de la forma esperada, i que els fluxos de potència de cadascun dels components són coherents els uns amb els altres, és a dir, que l'estat de funcionament d'un d'ells afecta al control dels altres tal com s'ha decidit. Per exemple, l'estat de funcionament de la bateria depèn del funcionament de la placa fotovoltaica i es pot observar que un canvi en un dels components provoca una pertorbació en els altres fins que automàticament arriben a un nou estat d'equilibri.

A més a més, tot i haver anat implementant els diferents components pas a pas i en cadascun dels estadis de la microxarxa aquesta ha pogut funcionar satisfactòriament, de manera que es tracta d'un sistema molt flexible i també és de suposar que es pugui ampliar fàcilment degut a la naturalesa modular d'aquesta.

Limitacions del sistema

Durant la modelització del sistema han sorgit diversos problemes que limiten la possibilitat de modificacions a la microxarxa.

- El control de la placa fotovoltaica no permet instal·lar gaire més potència de la que ja està instal·lada actualment, ja que un canvi massa brusc fa que el sistema no sigui estable.
- Escalar el temps fent que un dia transcorri en 3 segons fa que la dinàmica del sistema en estat transitori no sigui coherent amb la resta, ja que la duració d'aquest estat segueix representant-se en la escala real de temps.
- Degut a problemes d'inicialització, el sistema per a ser capaç d'estabilitzar-se requereix un mínim de resistència i inductància entre els dos generadors ideals, així que obliga a augmentar la distància entre aquests o a implementar resistències i inductàncies expressament només per a millorar-ne l'estabilitat.
- Amb la bateria activa, la simulació transcorre amb una lentitud inadmissible.

Acció de futur

Apart de millorar el control per a reduir els problemes llistats anteriorment, l'acció de futur es centrarà en trobar una manera d'implementar un droop de freqüència que permeti repartir de forma satisfactòria el flux de potència entre els dos generadors.

Agraïments

Vull agrair a l'Enric Sánchez per la seves inestimables ajuda i paciència sense les quals no podria haver realitzat aquest projecte.

També he d'agrair al departament CITCEA-UPC per haver-me procurat accés als programes necessaris per al treball, però sobretot per l'experiència que he obtingut durant aquests últims mesos.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

Articles i literatura

- [1] HU,J.,HE,Y.: *Modeling and control of grid-connected voltage-sourced converters under generalized unbalanced operation conditions*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 23(3):903 –913, 2008
- [2] EGEA-ALVAREZ, A., JUNYENT-FERRÉ, A., GOMIS-BELLMUNT, O.: *Active and Reactive Power Control of Grid Connected Distributed Generation Systems*
- [3] CLARKE, E.: *Circuit Analysis of AC Power*.John Wiley and Sons, Chichester (1941)
- [4] PARK, R.H.: *Two-reaction theory of synchronous Machines*. AIEE Transactions 48,716-730 (1929)
- [5] PRIETO-ARAUJO, E., OLIVELLA-ROSELL, P., CHEAH-MAÑE, M.,VILLAFILA-ROBLES, R., GOMIS-BELLMUNT, O.: *Renewable energy emulation concepts for microgrids*. 27 May 2015
- [6] TREMBLAY, O., DESSAINT, L.A.: *Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications*. Stavanger, Norway, May 13 - 16, 2009
- [7] RAZA, M., SCHÖNLEBER, K., GOMIS-BELLMUNT, O.: *Droop Control Design of Multi-VSC Systems for Offshore Networks to Integrate Wind Energy*.14 October, 2016
- [8] PRIETO-ARAUJO, E., EGEA-ALVAREZ, A., FEKRIASL, S., GOMIS-BELLMUNT, O.: *DC Voltage Droop Control Design for Multiterminal HVDC Systems Considering AC and DC Grid Dynamics*. 2 April 2016 (p.581)

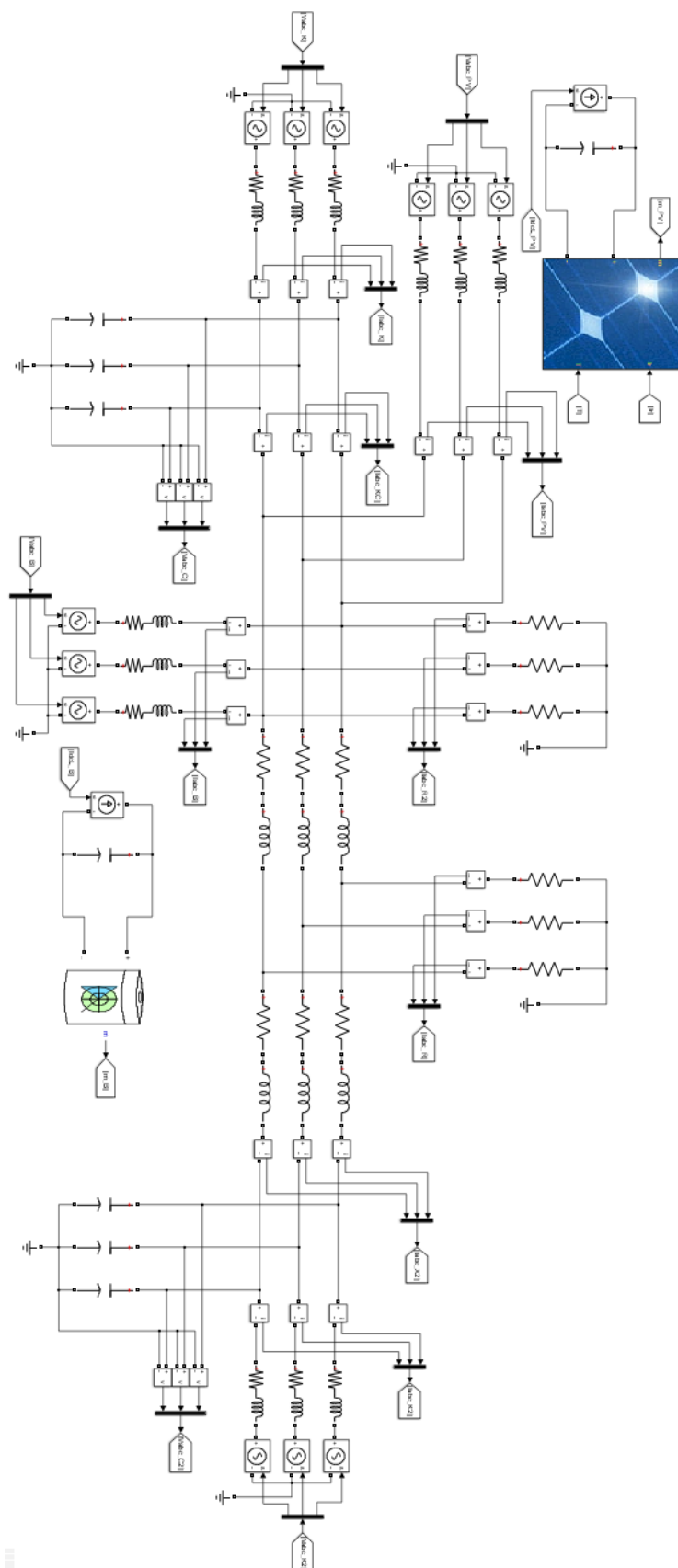
Pàgines web

- [9] <https://es.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/pvarray.html>
- [10] <http://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/promedio-de-la-radiaci%C3%B3n-solar>
- [11] <http://bateriasindustrialesytraccion.es/es/baterias-industriales/7-bateria-industrial-24v-250ah.html>

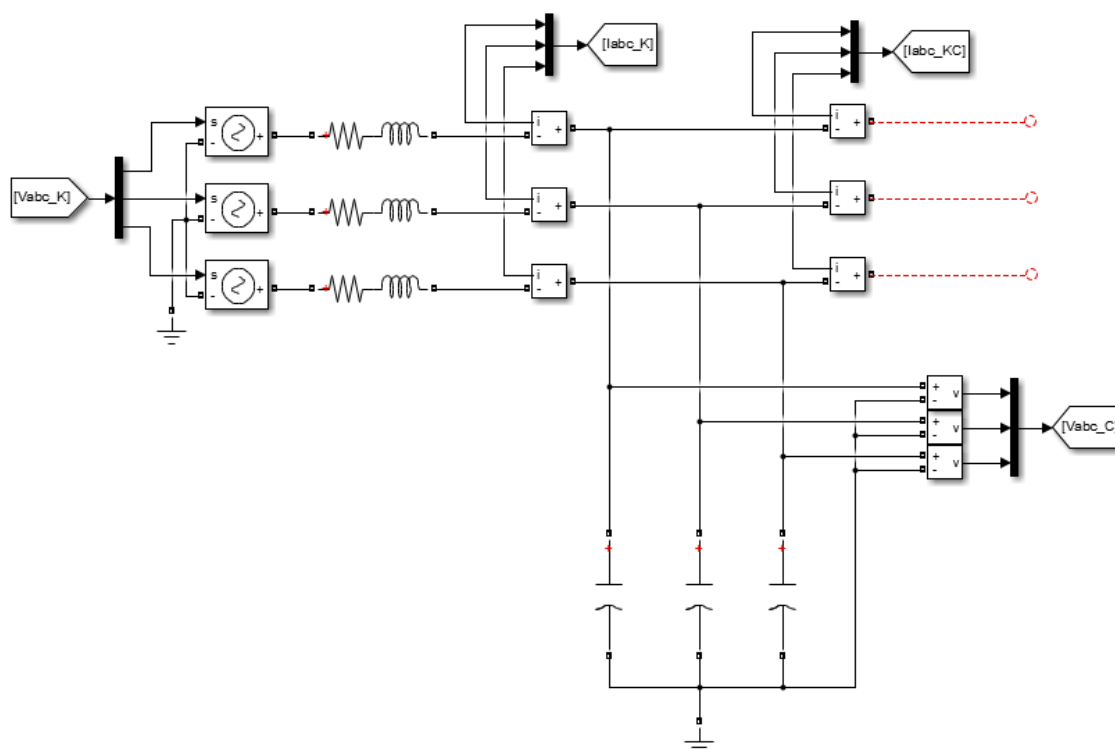
Annexos

Annex 1: Circuit elèctric i de control en Simulink

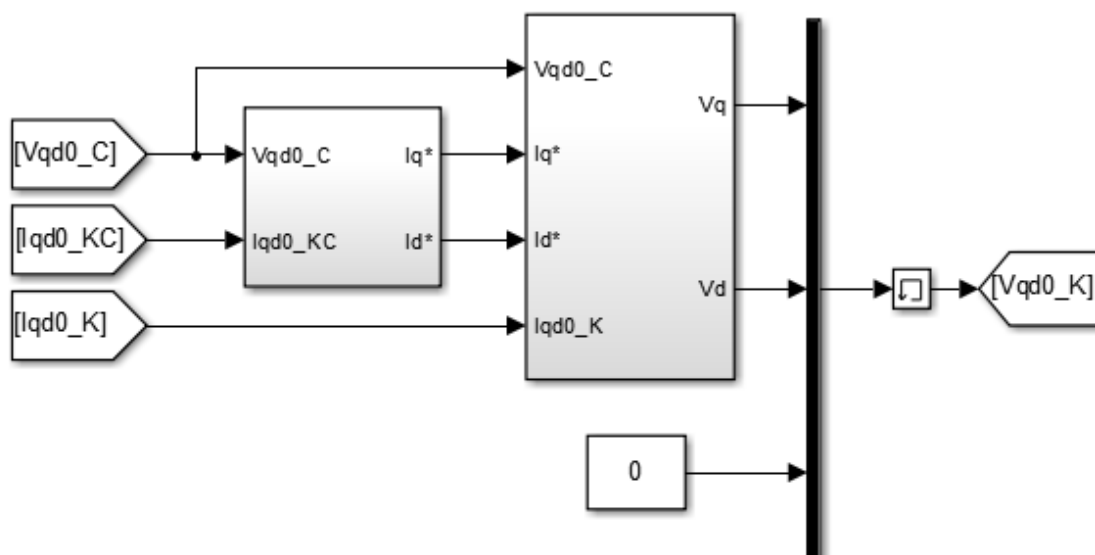
Circuit complet



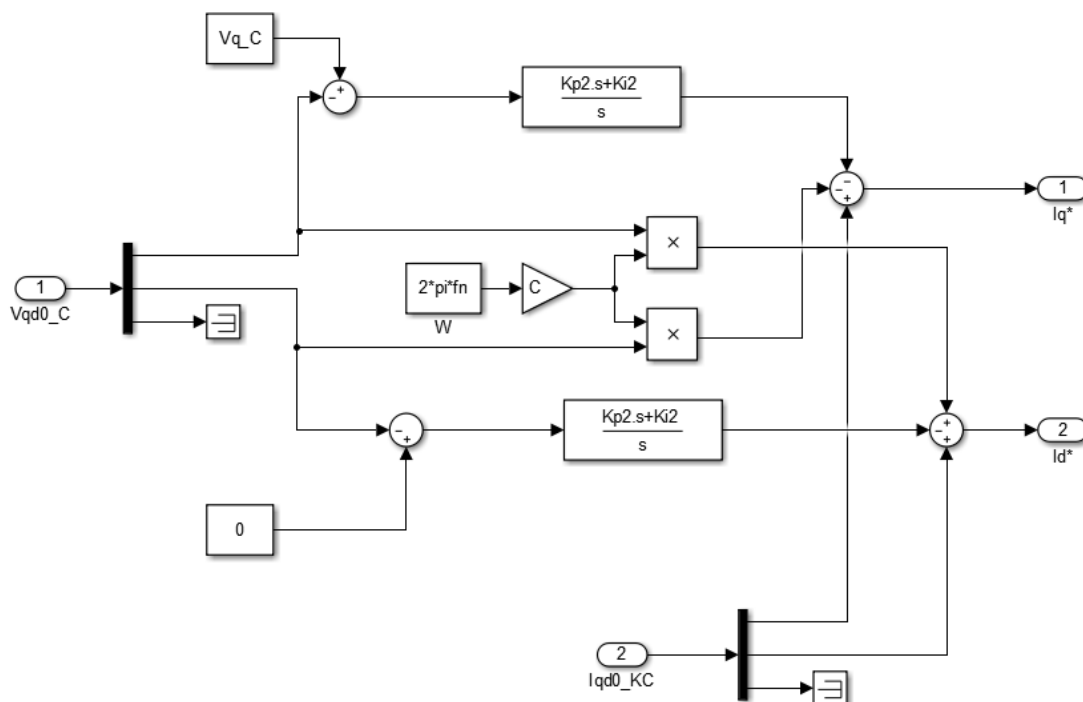
Ampliació a la generació de la xarxa



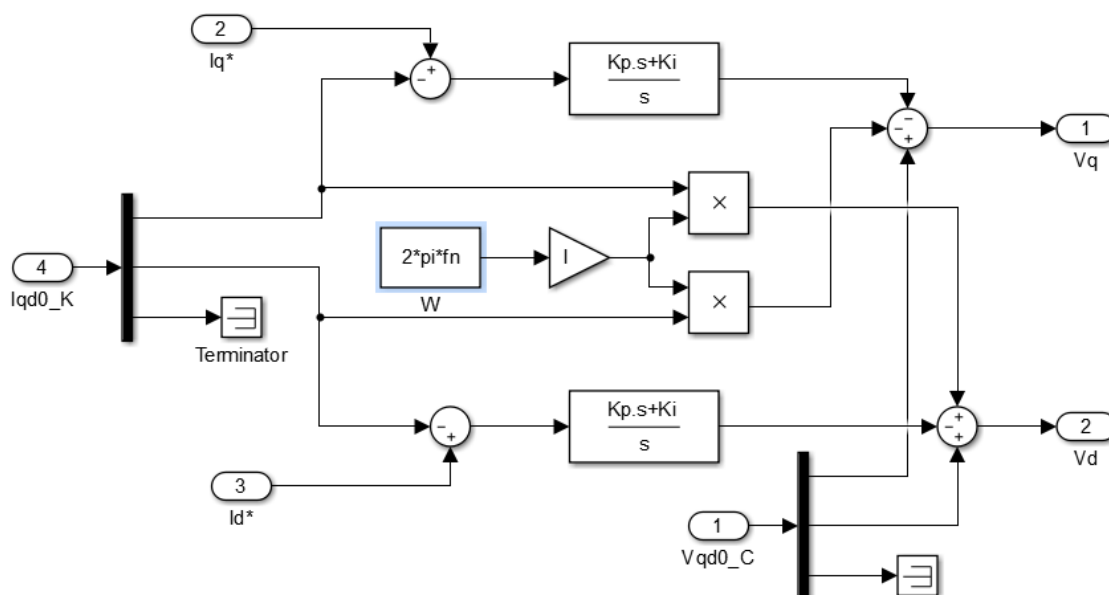
Llaç de control de la generació de xarxa



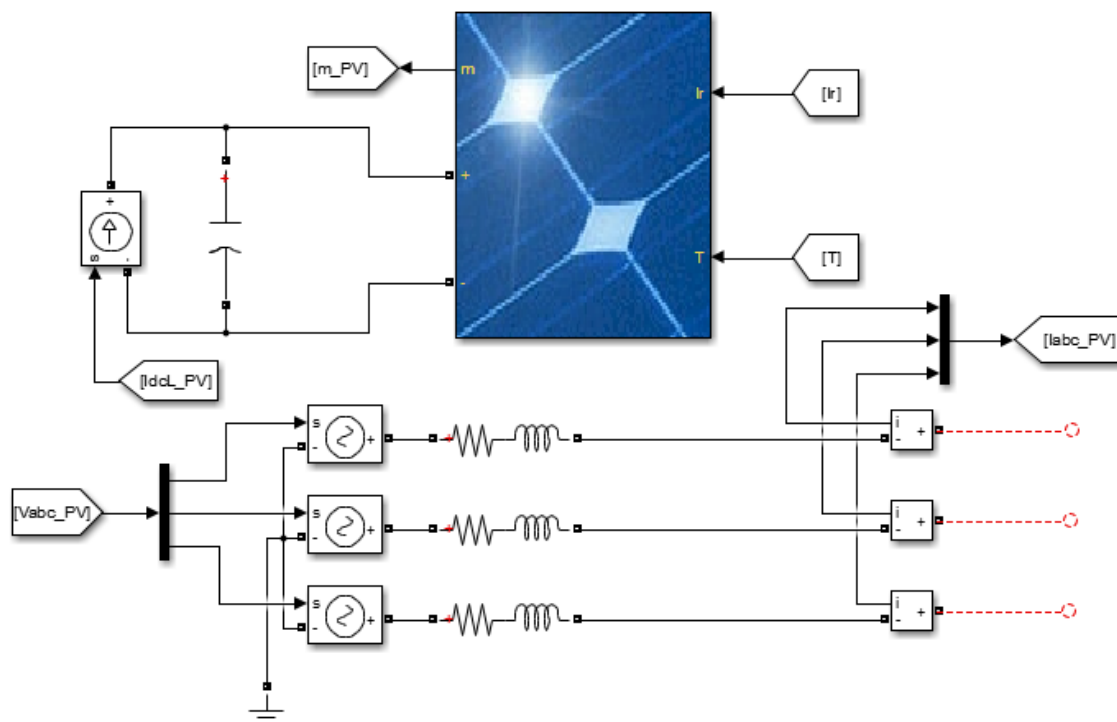
Voltage loop



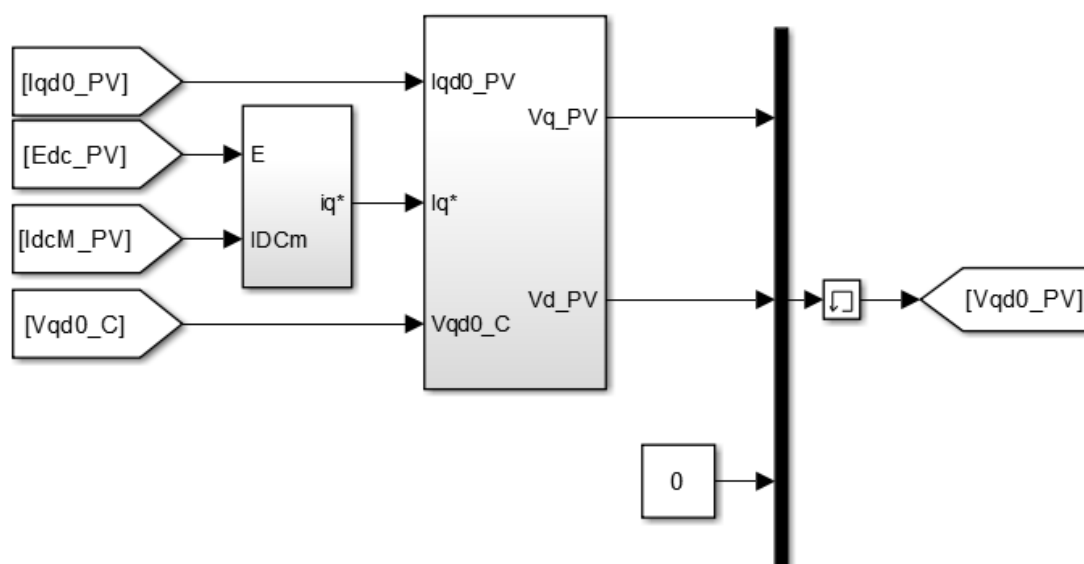
Current loop



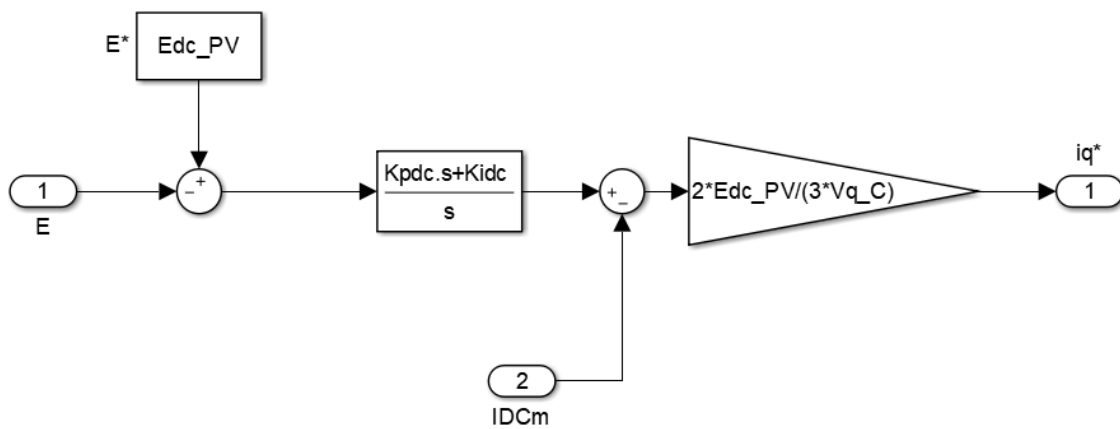
Ampliació PV



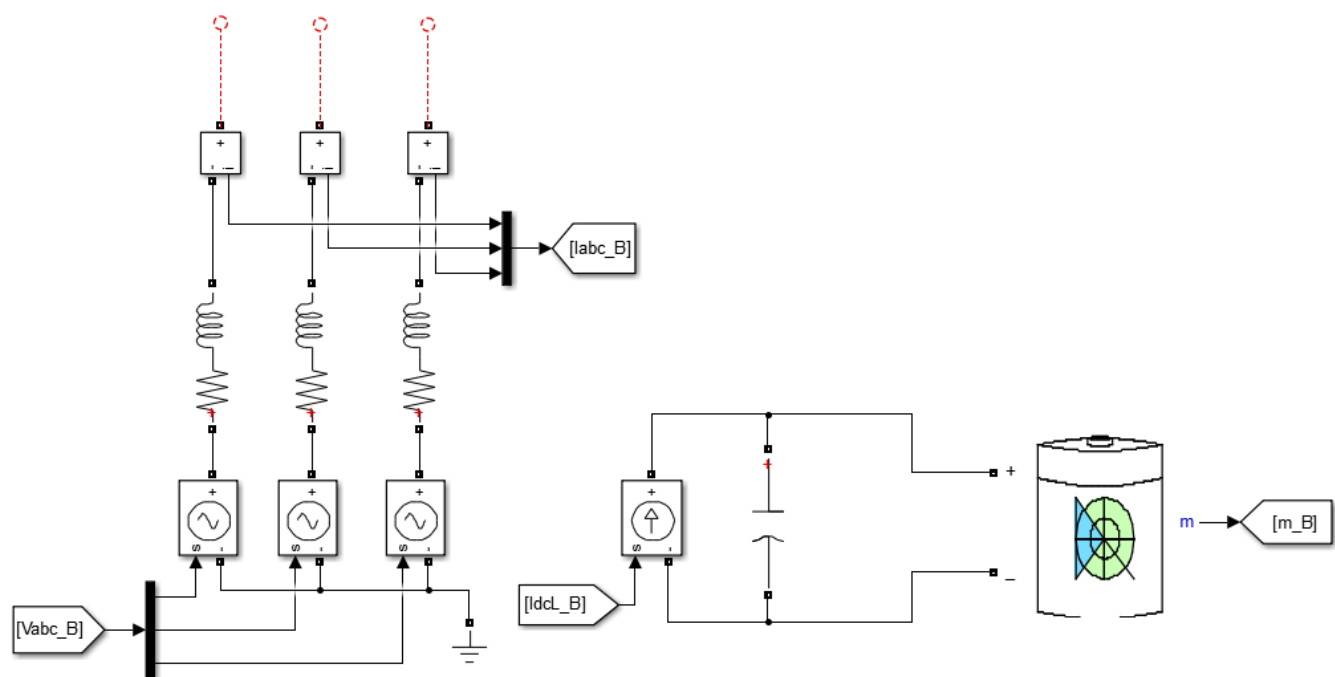
Llaç de control de PV



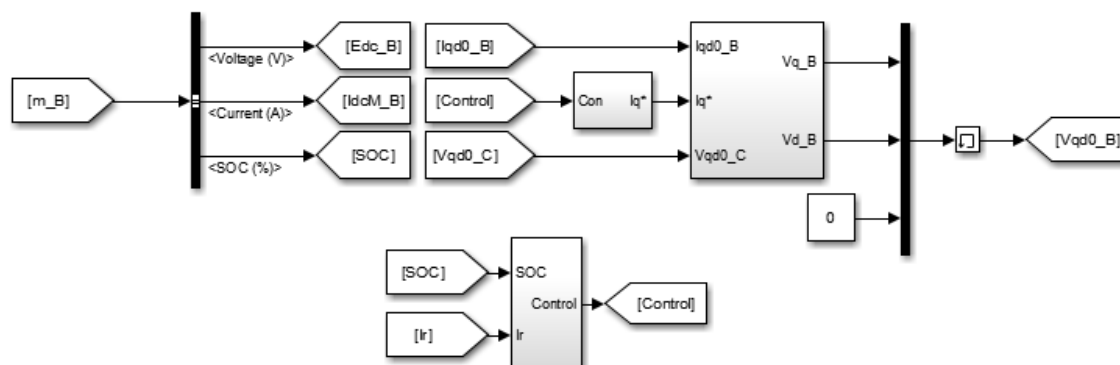
Regulació del corrent de contínua de PV



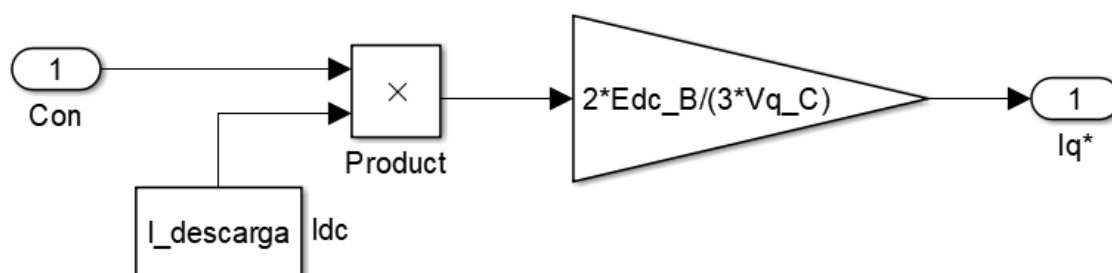
Ampliació Bateria



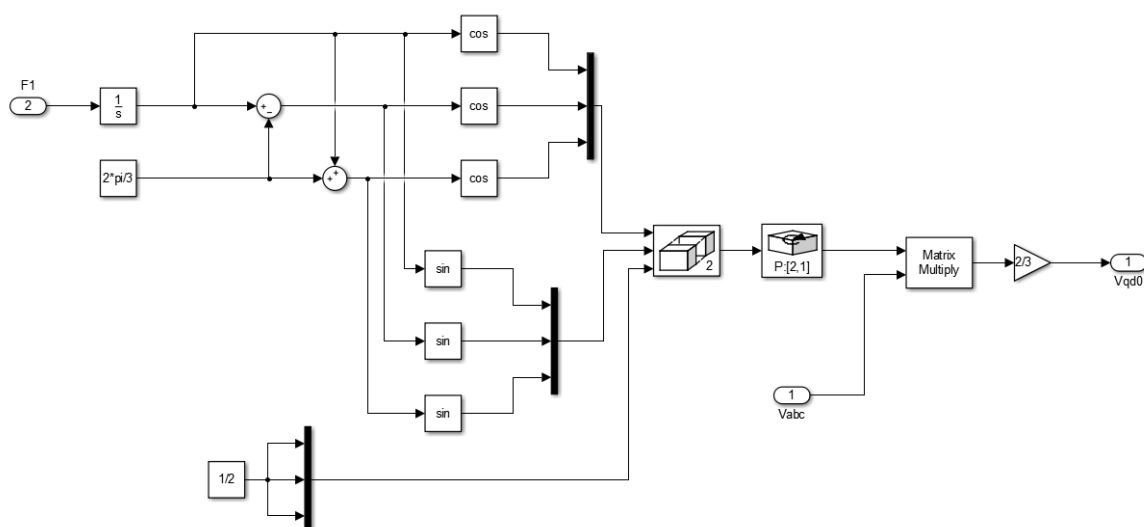
Llaç de control de la bateria



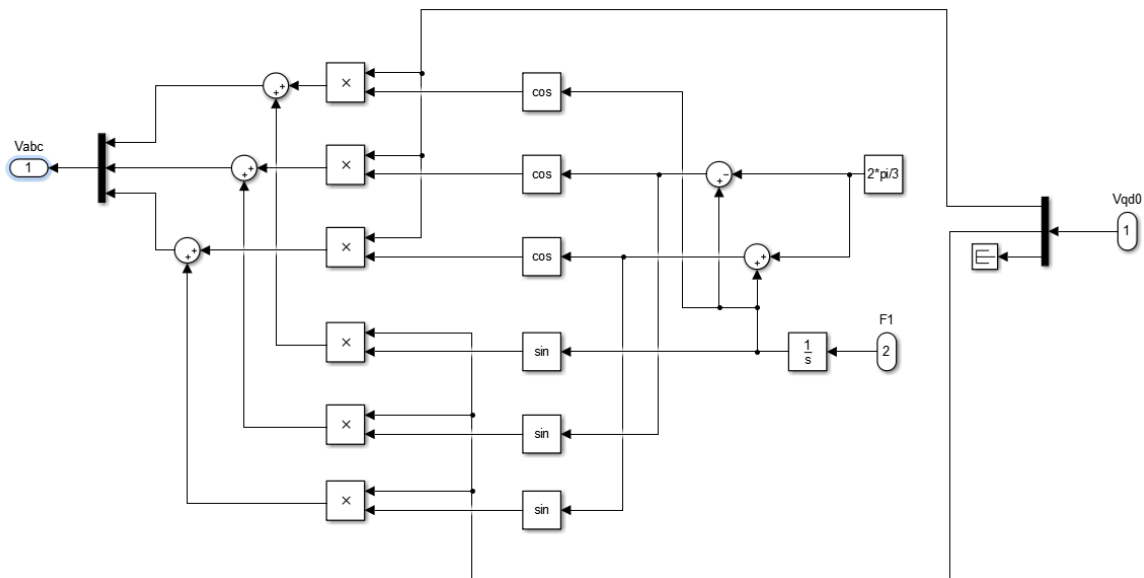
Regulador d'intensitat de la bateria



Transformada de Park

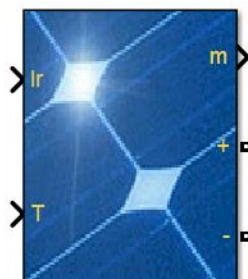


Antitransformada de Park



Annex 2: Dialog Box de blocs utilitzats

PV Array



Block Parameters: PV Array

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings
40

Series-connected modules per string
10

Module data

Module: 1Soltech 1STH-215-P

☐ Plot I-V and P-V characteristics when a module is selected

Maximum Power (W)	Cells per module (Ncell)
213.15	60
Open circuit voltage Voc (V)	Short-circuit current Isc (A)
36.3	7.84
Voltage at maximum power point Vmp (V)	Current at maximum power point Imp (A)
29	7.35
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)
-0.36099	0.102

Display I-V and P-V characteristics of ...
array @ 1000 W/m2 & specified temperatures

T_cell (deg. C) [45 25]

Plot

Model parameters

Light-generated current IL (A)
7.8649

Diode saturation current IO (A)
2.9259e-10

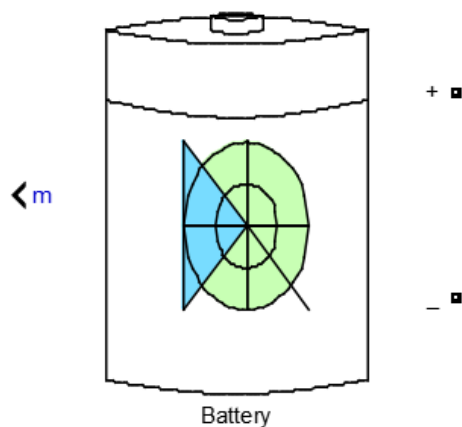
Diode ideality factor
0.98117

Shunt resistance Rsh (ohms)
313.3991

Series resistance Rs (ohms)
0.39383

OK Cancel Help Apply

Battery



Block Parameters: Battery2

Battery (mask) (link)

Implements a generic battery that model most popular battery types. Temperature effects can be specified for Lithium-Ion battery type.

Parameters Discharge

Type:

Nickel-Metal-Hydride

Nominal voltage (V)

24

Rated capacity (Ah)

250/28800

Initial state-of-charge (%)

100

Battery response time (s)

30/2880000

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Battery2

Battery (mask) (link)

Implements a generic battery that model most popular battery types. Temperature effects can be specified for Lithium-Ion battery type.

Parameters Discharge

☐ Determined from the nominal parameters of the battery

Maximum capacity (Ah)

0.0093483

Fully charged voltage (V)

28.2712

Nominal discharge current (A)

0.0017361*28800

Internal resistance (Ohms)

27.648/28800

Capacity (Ah) at nominal voltage

0.0083467

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]

[26.0339 0.00173611]

Display characteristics

OK Cancel Help Apply

